



Pedro Samuel dos Santos Gama

Licenciado em Engenharia Geológica

**Injeção de caldas de cimento em
fundações rochosas de barragens:
Revisão crítica de metodologias**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Geológica (Geotecnia)

Orientadora: Doutora Ana Paula Fernandes da Silva, Prof^a. auxiliar, FCT-UNL

Co – Orientador: António da Silva Gomes, Inv. coordenador, aposentado, LNEC

Júri:

Presidente: Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho, Prof. auxiliar – FCT/UNL

Vogais: Doutora Maria Luísa Mendes de Vasconcelos Braga Farinha, Inv^a. auxiliar – LNEC

Doutora Ana Paula Fernandes da Silva, Prof^a. auxiliar – FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março, 2012

Injeção de caldas de cimento em fundações rochosas de barragens: Revisão crítica de metodologias

Copyright © Pedro Samuel dos Santos Gama, 2012

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A realização desta dissertação foi o culminar de um percurso académico de vários anos, representando longas horas de estudo, esforço e dedicação, e que não teria sido possível sem o apoio e colaboração de diversas pessoas, a quem gostaria de expressar os meus agradecimentos:

À Professora Ana Paula da Silva, pela orientação, revisão crítica e paciência demonstrada no decorrer desta dissertação, e pela amizade e incentivo ao longo de todo o percurso académico;

Ao Professor António Silva Gomes, pela amizade, orientação e por todos os conhecimentos transmitidos ao longo desta dissertação;

Ao Professor Pedro Lamas, pela amizade e constante disponibilidade para ajudar;

Ao Eng. Rocha Afonso pela autorização em consultar e utilizar os dados referentes à barragem da Apartadura;

Ao Doutor Eng. João Marcelino por ter facilitado a consulta dos mesmos;

Ao Eng. Fernando Rodrigues, pela total disponibilidade para atender aos meus pedidos de esclarecimentos e pela simpatia demonstrada;

Aos meus pais, por todos os sacrifícios que fizeram por mim, pela paciência que tiveram ao longo de todos estes anos e pela educação e valores que me inculcaram, que me tornaram na pessoa que sou hoje;

Aos meus avós, José, Norberto e Etelvina, que embora já não estando presentes, estarão sempre comigo no meu coração;

À restante família pelo constante apoio e motivação.

Aos colegas Pedro, Sónia, Joana, Raquel, Gonçalo, Rute, Tiago entre outros, pela amizade e companheirismo demonstrado ao longo do percurso académico.

Aos amigos Hugo, Rui e André, pelo seu apoio incondicional e por os todos os momentos de devaneio proporcionados.

A todos o meu mais profundo e sincero obrigado.

Resumo

O tratamento de fundações rochosas de barragens mediante a injeção de caldas à base de cimento, de forma a melhorar as respectivas propriedades mecânicas e/ou hidráulicas, é uma prática comum no âmbito deste tipo de obras. O respetivo projeto pode, contudo, basear-se em diferentes metodologias que evoluíram na sequência das experiências efetuadas, por especialistas conceituados, em todo o mundo

Com vista a contribuir para uma melhor perceção daquelas metodologias, a presente dissertação, após uma breve síntese da evolução histórica do método em referência, introduz os conceitos que lhe estão mais frequentemente associados. Segue-se a abordagem de diferentes metodologias atualmente utilizadas, bem como uma descrição dos procedimentos executivos habituais relacionados com a execução das designadas cortinas de impermeabilização

Finalmente, recorrendo aos conhecimentos previamente introduzidos, apresenta-se um caso de estudo correspondente à aplicação hipotética do método GIN à execução da cortina de impermeabilização da barragem da Apartadura. Os resultados desta aplicação são comparados com os resultados obtidos na cortina efetivamente executada de acordo com a metodologia habitual – o uso do chamado método de *split-spacing*, com utilização de caldas de viscosidade crescente, sintetizando-se, por fim, as principais conclusões obtidas.

Palavras-chave: Cortina de impermeabilização, barragens, tratamento de fundações rochosas, injeções de cimento, método GIN

Abstract

The treatment of rock foundation dams by injecting cement based grouts, in order to improve its mechanical and/or hydraulic properties, is a common practice in these types of geotechnical works. Its design may, however, be based in different methodologies that have evolved, through practice, by renowned experts worldwide.

In order to contribute to a better perception of those methodologies, the current dissertation, after a brief historical summary, introduces the concepts that they are most frequently associated with. The different methodologies that are used today are then addressed, as well as a description of the usual executive procedures related to the execution of the so called grout curtains.

Finally, using the previously introduced knowledge, a case study is presented, of an hypothetical application of the GIN method on the execution of a grout curtain in Apartadura dam. The results of this exercise are then compared with those obtained from the actual execution of the curtain according to the usual methodology - use of the so called “split spacing method” with increasing viscosity grouts. At last, the main conclusions are summarized.

Key words: Grout curtains, dams, rock mass grouting treatment, injection of cement based grouts, GIN method

Símbolos

η - Viscosidade dinâmica;

η' – Viscosidade aparente;

η_B – Viscosidade plástica;

τ - Tensão de corte;

A – Secção transversal do furo;

c – Coesão;

c_t – Coesão de teste;

D – Recobrimento mínimo de terreno;

D_{95} – Diâmetro da partícula a que corresponde 95% de material passado (mm);

e – Energia específica;

F – Impulsão;

h – Espessura do *filter cake*;

K – Fator de injectabilidade;

K_{pc} – Coeficiente de crescimento do *cake*;

K_{pf} – Coeficiente de pressofiltração;

L – Comprimento do trecho de ensaio;

N – Velocidade de rotação;

p – Pressão de injeção;

P – Pressão de água;

P_0 – Pressão de água inicial;

P_F – Pressão final de injeção;

P_n – Pressão normalizada;

$P_{MÁX}$ – Pressão máxima de teste;

Q – Caudal;

R – Velocidade de penetração;

R – Penetrabilidade;

R_t – Penetrabilidade de teste;

t – Duração do ensaio;

T – Torque;

V – Volume de calda injetada por cada 1 m de furo tratado;

V_i – Volume inicial da amostra;

V_f – Volume do filtrado;

V_F – Volume final de injeção.

Siglas e abreviaturas

ASCE – *American Society of Civil Engineers*;

ASME – *American Society of Mechanical Engineers*

GIN – *Grouting Intensity Number*;

INAG – Instituto da Água;

ICOLD – *International Congress/Commission on Large Dams*;

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;

SPES – Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica;

USACE – *United States Army Corps of Engineers*;

A/C – relação Água/Cimento;

ASTM – *American Society for Testing and Materials*;

DHH – *Down Hole Hammer*;

et al. – *et alii*, e outros;

FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa;

HMG – *High Mobility Grout*;

ib. – *ibidem*, no mesmo lugar;

IPQ – Instituto Português da Qualidade;

LMG – *Low Mobility Grout*;

Lu – Lugeon;

MD – Margem Direita;

ME – Margem Esquerda;

MWD – *Measurement While Drilling*;

NF – Nível freático;

op. cit. – *opere citatum*, obra citada;

QEGC – *Quantitatively Engineered Grout Curtains*;

RI – Rácio de injectabilidade;

rpm – Rotações por minuto;

THH – *Top Hole Hammer.*

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Símbolos	vii
Siglas e abreviaturas	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS INJEÇÕES DE PERMEAÇÃO EM MACIÇOS ROCHOSOS	3
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
2. INJEÇÕES DE PERMEAÇÃO EM FUNDAÇÕES ROCHOSAS DE BARRAGENS	7
2.1. OBJETIVOS DAS INJEÇÕES DE PERMEAÇÃO EM MACIÇOS ROCHOSOS	7
2.1.1. Redução de caudais	8
2.1.2. Aumento da capacidade resistente	8
2.1.3. Enchimento de cavidades de dissolução	9
2.2. TIPOS DE INJEÇÃO DE PERMEAÇÃO NA FUNDAÇÃO DE BARRAGENS	9
2.2.1. Injeções de consolidação	9
2.2.2. Cortinas de impermeabilização	11
2.3. TIPOS DE CALDAS	12
2.3.1. Fluidos newtonianos e binghamianos	12
2.3.1.1. Aplicabilidade das caldas à base de cimento	15
2.3.2. Reologia de caldas à base de cimento	17
2.3.2.1. Viscosidade	19
2.3.2.2. Coesão e tixotropia	19
2.3.2.3. Decantação	20
2.3.2.4. Pressofiltração	22
2.3.2.5. Outros aspetos	23
2.4. ANTEPROJETO DA CORTINA	25

2.4.1.	Estudo das características geológicas locais	25
2.4.1.1.	Tipo de litologia e sua estrutura.....	26
2.4.1.2.	Orientação das fraturas.....	26
2.4.1.3.	Características das fraturas	27
2.4.1.4.	Hidrologia e escoamento subterrâneo.....	28
2.5.	ASPETOS GERAIS DE PROJETO.....	29
2.5.1.	Ensaio de absorção de água.....	29
2.5.1.1.	Evolução do ensaio tipo Lugeon.....	30
2.5.1.2.	Execução do ensaio tipo Lugeon	31
2.5.1.3.	Interpretação dos resultados	33
2.5.1.4.	Limitações do ensaio	33
2.5.2.	Definição do critério de fecho da injeção.....	34
2.5.2.1.	O conceito de “nega”	34
2.5.2.2.	Critério de condutividade hidráulica	35
2.5.2.3.	Critério de absorção de calda.....	36
2.5.2.4.	Critério geológico	38
2.5.3.	Galerias de injeção	39
2.6.	ASPETOS EXECUTIVOS DOS FUROS PARA TRATAMENTO DE FUNDAÇÕES	40
2.6.1.	Técnicas de furação	41
2.6.1.1.	Rotação.....	42
2.6.1.2.	Rotopercussão.....	43
3.	ASPETOS GERAIS EXECUTIVOS E DE CONTROLO DE QUALIDADE	45
3.1.	ALGUNS ASPETOS A CONTEMPLAR NO DIMENSIONAMENTO.....	45
3.1.1.	Profundidade da cortina.....	45
3.1.2.	Extensão da cortina	46
3.1.3.	Espaçamento e orientação de furos.....	47
3.1.4.	Pressões de injeção	49
3.2.	ENSAIOS DE INJECTABILIDADE	50
3.3.	PREVISÃO DO CONSUMO DE CALDA	51
3.4.	PROCEDIMENTO DE INJEÇÃO	52
3.4.1.	Definição do comprimento dos trechos	53

3.4.2.	Definição do espaçamento entre furos	55
3.4.3.	Sequência de injeção	57
3.4.3.1.	Descendente sem obturador	58
3.4.3.2.	Descendente com obturador	60
3.4.3.3.	Ascendente com obturador	61
3.4.3.4.	Circuito de injeção	62
3.4.4.	Equipamentos acessórios	63
3.4.4.1.	Tubo guia	63
3.4.4.2.	Lajes e maciços de injeção	64
3.5.	CONTROLO DE QUALIDADE	65
3.5.1.	Antes da injeção	66
3.5.1.1.	Qualidade da calda	66
3.5.1.2.	Diagrafias durante a furação	67
3.5.2.	Durante a injeção	68
3.5.2.1.	Equipamentos de monitorização manuais	69
3.5.2.2.	Equipamentos de monitorização automática	70
3.5.2.3.	Observação da superfície	71
3.5.3.	Verificação da eficiência	73
3.5.4.	Durabilidade do tratamento	73
4.	METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO	75
4.1.	MÉTODO DE HOUSLBY (1976; 1990)	75
4.1.1.	Avaliação da necessidade de tratamento	75
4.1.2.	Pressões de injeção a utilizar	77
4.1.3.	Volumes de calda a injetar e a sua relação A/C	78
4.2.	MÉTODO DE SILVA GOMES (1991)	80
4.2.1.	Conceitos gerais	80
4.2.1.1.	Pressões de injeção	82
4.2.1.2.	Tipos de calda a utilizar e sua relação A/C	83
4.2.1.3.	Verificação da eficiência do tratamento	84
4.3.	MÉTODO GIN (Lombardi e Deere, 1993)	85
4.3.1.	Conceitos gerais	85

4.3.2.	Definição do GIN.....	86
4.3.2.1.	Valor GIN	87
4.3.2.2.	Pressões de injeção a utilizar	88
4.3.2.3.	Volume de calda a injetar e sua relação A/C.....	88
4.3.2.4.	Relação entre o GIN e as características da calda	89
4.3.3.	Implementação do GIN	90
4.3.3.1.	Controlo do processo de injeção.....	91
4.3.3.2.	Relação entre GIN e ensaios tipo Lugeon.....	93
4.3.4.	Comparação com os métodos convencionais	94
4.3.5.	Vantagens do método	95
4.4.	MÉTODO DE WILSON E DREESE (1998)	97
5.	CASO DE ESTUDO – APLICAÇÃO DO MÉTODO GIN AO TRATAMENTO DA BARRAGEM DA APARTADURA	101
5.1.	BARRAGEM DA APARTADURA.....	101
5.1.1.	Caracterização geral	101
5.1.2.	Delimitação da área em estudo	103
5.2.	ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	104
5.2.1.	Geologia.....	104
5.2.2.	Geomorfologia.....	104
5.2.3.	Tectónica e neotectónica	105
5.2.4.	Sismicidade.....	105
5.3.	ZONAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO.....	107
5.3.1.	Global	107
5.3.2.	Hidráulico	109
5.4.	EXECUÇÃO DA CORTINA DE IMPERMEABILIZAÇÃO	110
5.4.1.	Metodologia geral de injeção aplicada	111
5.4.2.	Pressões de injeção	113
5.5.	APLICAÇÃO DO MÉTODO GIN	114
5.5.1.	Considerações adotadas.....	114
5.5.2.	Metodologia aplicada.....	115

5.5.3.	Definição do GIN.....	121
5.5.3.1.	Curva GIN.....	121
5.5.3.2.	Pressão máxima de injeção	123
5.5.3.3.	Volume máximo de calda a injetar e seu traço	123
5.6.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	127
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	131
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	139
	ANEXOS	147
	ANEXO 1 – DADOS V/P PROCESSADOS	
	ANEXO 2 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS DADOS V/P	
	ANEXO 3 – OUTLIERS E SUA JUSTIFICAÇÃO	
	ANEXO 4 - GRÁFICOS P/V COM POTENCIAIS CURVAS GIN	
	ANEXO 5 - CURVAS GIN ADOTADAS	

Índice de figuras

Figura 1.1 - Exemplo do tratamento por injeções de permeação na fundação de barragens de aterro em maciços rochosos	1
Figura 2.1 - Cortina de impermeabilização e o seu papel em diminuir o gradiente hidráulico	8
Figura 2.2 - Modelos reológicos de fluidos (a) newtonianos e (b) binghamianos	13
Figura 2.3 - Comportamento reológico dos diferentes tipos de calda.....	15
Figura 2.4 - Conceito de tixotropia.....	20
Figura 2.5 - Comparação da tixotropia de caldas de cimento puras.....	20
Figura 2.6 - Velocidades médias de decantação de diferentes caldas à base de cimento com diferentes relações A/C.....	21
Figura 2.7 - Velocidades médias de decantação de caldas à base de cimento.....	22
Figura 2.8 - Pormenor da influência da atitude das descontinuidades nas forças de levantamento hidráulico geradas na sequência das injeções	27
Figura 2.9 - Esquematização do ensaio tipo Lugeon com obturador duplo.....	30
Figura 2.10 - Pormenor da zona central de uma cortina de impermeabilização com interseção dos furos inclinados no fundo do vale	41
Figura 3.1 - Fase inicial de dimensionamento de uma cortina de impermeabilização	48
Figura 3.2 - Atitudes possíveis para furos em função de diversas atitudes das famílias de descontinuidades	48
Figura 3.3 - Inclinação mais eficaz dos furos de injeção na presença de famílias de descontinuidades subverticais e subperpendiculares entre si.....	49
Figura 3.4 - Representação gráfica da (1) “regra europeia” e (2) “regra americana”	49
Figura 3.5 - Correlação entre absorção de água e calda	52
Figura 3.6 - Pormenor de como são tratadas diferentes tipos de descontinuidades	54
Figura 3.7 - Representação esquemática de uma sequência de furos realizada segundo o método split-spacing.....	56
Figura 3.8 - Faseamento de uma cortina de impermeabilização profunda	57
Figura 3.9 - Alterações mais comuns ao faseamento inicial de injeção.....	57
Figura 3.10 - Técnica para a realização de um furo descendente sem obturador	59
Figura 3.11 - Técnica para a realização de um furo descendente com obturador	60
Figura 3.12 - Técnica para a realização de um furo ascendente com obturador.....	62
Figura 3.13 – Técnica para a realização de um furo descendente com circuito de injeção.....	63
Figura 3.14 - Esquema da utilização do tubo guia.....	64

Figura 3.15 - Exemplos de maciços de contenção.....	65
Figura 4.1 - Fluxograma para definição da necessidade de execução de cortina de impermeabilização	76
Figura 4.2 - Pressões de injeção admissíveis para diferentes tipos de rochas.....	78
Figura 4.3 - Fluxograma para definição dos traços iniciais das caldas	79
Figura 4.4 - Abertura de descontinuidades tratadas por sequências de furos de injeção segundo o método de Silva Gomes.....	81
Figura 4.5 - Limites impostos ao processo de injeção pelo método (a) tradicional, ADG, e (b) GIN, ABCG.....	86
Figura 4.6 - Conjunto de curvas GIN padrão	88
Figura 4.7 - Relação entre pressão, p , volume de calda injetado, V , abertura das descontinuidades, e , e penetrabilidade de uma calda, R	90
Figura 4.8 - Representação gráfica de (a) curva GIN e (b) curva de penetrabilidade correspondente	92
Figura 4.9 - Comparação dos métodos de injeção tradicional e GIN em termos de (a) relação A/C , (b) coesão, (c) pressão máxima e (d) pressão normalizada.....	94
Figura 4.10 - Orientação proposta para os furos de injeção segundo a metodologia de QEGC.....	99
Figura 5.1 - Planta e perfil transversal da barragem da Apartadura.....	101
Figura 5.2 - Localização geográfica da barragem da Apartadura	102
Figura 5.3 - Extrato do perfil geológico pelo eixo da barragem para a área em estudo.....	104
Figura 5.4 - Sismicidade instrumental em Portugal até 1995	106
Figura 5.5 - Carta de isossistas máximas observadas em Portugal continental.....	106
Figura 5.6 - Zonamento sísmico de (a) sismicidade afastada e (b) sismicidade próxima de Portugal continental	107
Figura 5.7 - Corte geológico-geotécnico segundo o eixo da barragem.....	109
Figura 5.8 - Disposição e orientação das cortinas de impermeabilização F-1, F-2 e F-3.....	111
Figura 5.9 - Fluxograma adotado para a metodologia de injeção.....	112
Figura 5.10 - Outliers identificados para a margem direita da fiada F-3.....	119
Figura 5.11 - Outliers identificados para a margem esquerda da fiada F-3.....	119
Figura 5.12 - Adaptação de possíveis curvas GIN aos dados referentes às injeções efetuadas na margem direita da fiada F-3	119
Figura 5.13 - Adaptação de possíveis curvas GIN aos dados referentes às injeções efetuadas na margem esquerda da fiada F-3	119
Figura 5.14 - Curva GIN definida para a zona da fiada F-3 referente à margem direita	126
Figura 5.15 - Curva GIN definida para a zona da fiada F-3 referente à margem esquerda	126

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Caracterização dos diferentes tipos de cimento utilizados atualmente	16
Tabela 2.2 - Dimensão dos grãos de cimento e respetiva penetrabilidade	16
Tabela 2.3 - Resumo dos vários aditivos, fillers e adjuvantes possíveis de utilizar na produção de caldas à base de cimento, bem como os seus efeitos e dosagem típica	17
Tabela 2.4 - Parâmetros importantes nas suspensões.....	24
Tabela 2.5 - Distâncias percorridas por uma calda de cimento com relação A/C de 1 em fissuras com diferentes aberturas, para uma pressão de injeção de 690 kPa.....	28
Tabela 2.6 – Relação entre os patamares de pressão utilizados num ensaio tipo Lugeon	32
Tabela 2.7 - Condições das discontinuidades do maciço rochoso associadas a gamas de valores de absorção em Lu	32
Tabela 2.8 - Síntese da interpretação dos ensaios Lugeon	33
Tabela 2.9 - Sistema de classificação proposto por Deere.....	37
Tabela 2.10 - Critério de absorção para furos secundários sugerido por Deere.....	37
Tabela 3.1 - Ensaio para o controlo de qualidade das caldas	67
Tabela 4.1 – Princípios base do método GIN	91
Tabela 4.2 - Principais erros a serem evitados no método GIN	96
Tabela 5.1 - Resumo das atitudes da fracturação existente no maciço.....	108
Tabela 5.2 - Resumo das atitudes da estratificação existente no maciço	108
Tabela 5.3 - Características das duas sondagens realizadas no fundo do vale	108
Tabela 5.4 - Resumo das características das zonas geotécnicas definidas para o fundo do vale.....	109
Tabela 5.5 - Pressões utilizadas no decorrer dos ensaios tipo Lugeon	110
Tabela 5.6 - Pressões de injeção da calda	113
Tabela 5.7 - Pressões de injeção de calda para a fiada F-3	113
Tabela 5.8 - Resumo das adaptações implementadas para aplicar o método GIN à cortina de impermeabilização	115
Tabela 5.9 - Dados processados para o fundo do vale referentes à realização da cortina de impermeabilização F-3	117
Tabela 5.10 - Considerações a tomar aquando da análise dos gráficos representados nas figuras 5.10 e 5.11.....	118
Tabela 5.11 - Outliers referentes à Fiada F-3, margem direita	120
Tabela 5.12 - Outliers referentes à Fiada F-3, margem esquerda.....	120
Tabela 5.13 - Simbologia utilizada e seu significado	121

Tabela 5.14 - Valores GIN definidos para as várias fiadas.....	123
Tabela 5.15 - Totais de cimento injetados em ambas as margens para as três fiadas	125
Tabela 5.16 - Totais de água injetados em ambas as margens para as três fiadas.....	125
Tabela 5.17 - Relações A/C das caldas teóricas selecionadas para ambas as margens, por fiada.....	125

1. INTRODUÇÃO

1.1. GENERALIDADES

A descoberta de um local com as características ideais para a implementação de qualquer obra geotécnica em geral e de uma barragem em particular, é um dos passos mais importantes em todo o processo. Atualmente, é cada vez mais complicada a descoberta de tais locais devido ao constante aumento de ocupação do território para as mais variadas atividades. Como tal, a ocupação e reabilitação de zonas previamente consideradas menos adequadas para a construção de barragens tem vindo a ganhar importância.

As fundações da maioria das barragens com mais de 15 m de altura construídas em maciços rochosos, e até de algumas mais pequenas, são geralmente tratadas recorrendo à injeção de caldas à base de cimento, do inglês *grouting*, consistem na injeção, geralmente através de furos, de materiais apropriados mais ou menos impermeáveis sob pressão, para o interior de maciços rochosos ou terrosos, com o objetivo de alterar as respetivas características hidráulicas e/ou mecânicas. Os resultados destas injeções, designadas de permeação, são a selagem de vazios, fraturas ou descontinuidades, tornando assim os maciços menos permeáveis e conferindo-lhes uma maior resistência e menos deformabilidade (figura 1.1).

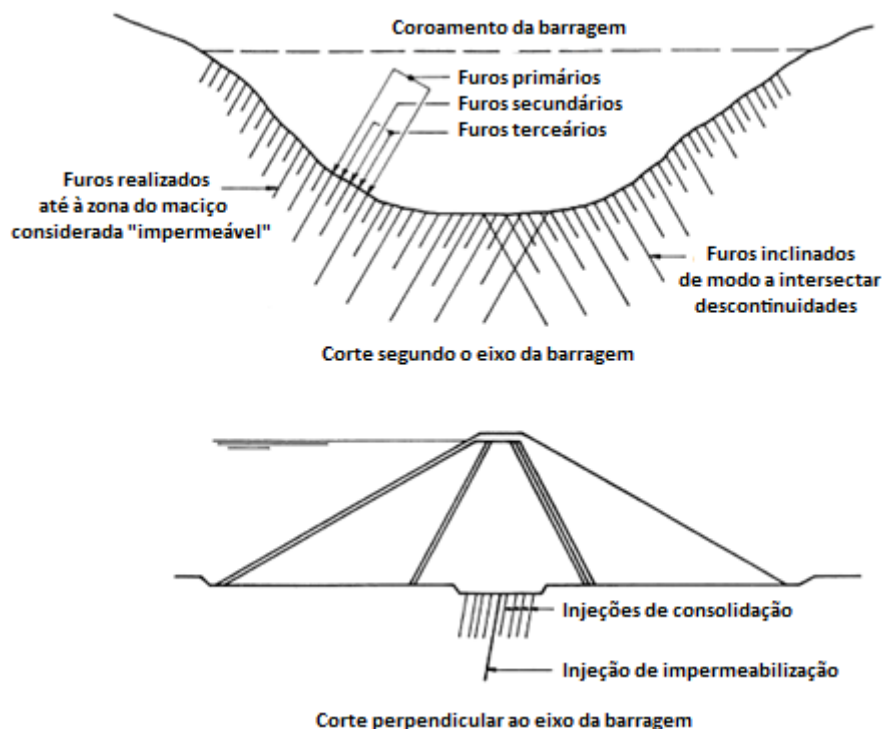


Figura 1.1 - Exemplo do tratamento por injeções de permeação na fundação de barragens de aterro em maciços rochosos (adaptado de Fell *et al.*, 2005)

O processo construtivo que antecede a injeção propriamente dita tem início com a execução de uma ou mais fiadas de furos desde a base de fundação da barragem, que se prolongam até uma dada profundidade. Em seguida são injetadas, sob pressão, as caldas através dos furos de modo a preencher os defeitos existentes no interior do maciço de fundação.

A maioria das injeções é realizada com caldas à base de cimento (C) Portland misturado com água (A) numa misturadora de velocidade elevada com razão A/C entre 5:1 a 0,5:1 (Fell *et al.*, 2005) de modo a obter-se uma calda capaz de penetrar os defeitos do maciço da fundação. Também podem usar-se caldas químicas no entanto, devido ao seu custo elevado e a alguns problemas ambientais associados a algumas delas, apenas se recorrem a estas em casos onde as de cimento não apresentem a eficácia desejada, como em maciços onde as fraturas existentes possuam uma abertura demasiado pequena.

Na maior parte dos casos, o projeto final das injeções só está concluído quando o tratamento em si tiver sido todo executado. Isto deve-se à grande variação das condições geológicas, geotécnicas e hidráulicas existentes no interior dos maciços, que exigem uma constante avaliação e modificação dos trabalhos ao longo da sua execução.

O primeiro critério, e usualmente o mais importante, consiste na definição de um esquema, figura 1.1, segundo o qual o tratamento deve ser realizado, que depende bastante do valor dado à água que se pode deixar perder sob a fundação e das características particulares do maciço a tratar, especialmente da sua propensão para sofrer erosão interna (*piping*). Embora seja impossível cortar por completo a circulação de água ao longo da fundação de uma barragem, na maioria das situações é suficiente reduzir o seu caudal e velocidade de escoamento para níveis aceitáveis.

Dependendo da metodologia de tratamento adotada pode-se recorrer, ou não, ao uso de diferentes caldas à base de cimento, podendo estas mudar apenas a sua viscosidade, através da variação da relação A/C, ou efetuando alterações mais complexas, que incluem a adição de adjuvantes, aditivos, etc.. Alguns destes aspetos irão ser abordados em maior detalhe nos capítulos subsequentes desta dissertação.

1.2. OBJETIVOS

No âmbito da presente dissertação, inserida no Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia), da Faculdade de Ciências de Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), propôs-se efetuar uma síntese dos conhecimentos atuais referentes às diversas metodologias utilizadas para a

execução de tratamentos de fundações rochosas de barragens através da execução de injeções de caldas à base de cimento.

A partir da década de 70 do século passado e um pouco por todo o mundo foram desenvolvidas diversas metodologias, sendo uma das primeiras a ser estruturada a proposta por Houlsby (1976), baseada na interpretação dos ensaios de absorção de água tipo Lugeon realizados usualmente a partir da fase de anteprojecto de uma barragem.

Ulteriormente, Silva Gomes (1991) propôs uma adaptação daquele método, com vista à sua aplicação no tratamento de fundações rochosas de barragens de aterro. Ainda na década de 90, surgiu na Europa um método proposto por Lombardi e Deere (1993) baseado no princípio GIN (*Grouting Intensity Number*), ou “número de intensidade de injeção”, que tem vindo a ser atualizado ao longo dos anos, essencialmente até final do século passado.

Em Portugal, a metodologia mais difundida e utilizada é aquela revista por Houlsby (1990), também conhecida internacionalmente como o método tradicional ou convencional. O método GIN, por sua vez, tem tido pouca divulgação em Portugal e, como tal, é ainda pouco utilizado. Espera-se, com esta dissertação, contribuir para melhorar a sua difusão.

Nesse sentido, são utilizados dados referentes à execução do trecho central da cortina de impermeabilização da barragem da Apartadura, projetada na década de 80 e construída no início da década seguinte, com o intuito de exemplificar a aplicação do método GIN a um caso real. Estes dados foram acedidos mediante autorização do Instituto da Água - INAG, tendo sido consultados em duas dissertações de mestrado da FCT-UNL, também elas relacionadas com a referida cortina da barragem da Apartadura (Carvalho, 1992; Ramos, 1995), e complementados com a consulta das partes diárias relativas à execução do tratamento, que se encontram arquivadas no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Devido ao facto desta barragem ter sido construída antes do aparecimento do método GIN, foi necessária a adaptação dos dados existentes, de modo a tornar possível a sua utilização.

1.3. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS INJEÇÕES DE PERMEAÇÃO EM MACIÇOS ROCHOSOS

O conceito de injetar uma mistura auto-endurecedora à base de cimento em profundidade foi inicialmente explorado em 1802, por Charles Bérigny (*in* Glossop, 1960) em Dieppe, França, com o objetivo de aumentar a capacidade portante de uma eclusa. Ao longo dos 40 anos subsequentes,

vários engenheiros franceses continuaram a explorar este conceito, focando-se principalmente na sua aplicação em eclusas, docas, canais e pontes.

Nos Estados Unidos da América, Worthen valeu-se destas injeções para tratar a fundação de um aqueduto e, 9 anos depois, recorreu também a elas para tratar as fundações de um cais de alvenaria na estrada de New Haven, em Westford (Weaver e Bruce, 2007).

De 1856 a 1858, em Inglaterra, Kinipple (*in* Glossop, 1961) realizou experiências com vista a demonstrar a aplicabilidade de caldas no preenchimento de vazios em betão embora, por 1883, continuasse a ter dificuldades em convencer os restantes engenheiros do potencial da sua descoberta. No entanto, as caldas de cimento continuaram a ser utilizadas internacionalmente e, em 1876, o primeiro projeto de injeções de permeação foi realizado com sucesso por Thomas Hawksley (*op. cit.*) em Rochdale, Inglaterra, sendo que outras aplicações destas injeções foram executadas em minas francesas e alemãs, túneis londrinos e docas escocesas e maltesas (Weaver e Bruce, *op. cit.*)

Na barragem de *New Croton*, em Nova Iorque, foram realizadas injeções em grande escala em maciços rochosos pela primeira vez, em 1893, enquanto que projetos de injeções de reabilitação eram aplicadas em pontes, quebra-mares e barragens em Inglaterra e no Egipto (Xanthakos *et al.*, 1994).

Em 1915, foi publicado o primeiro documento técnico relativo à injeção de maciços rochosos para a barragem de Estacada, Oregon (*Rands, 1915 in op.cit.*), despertando o interesse da comunidade internacional. Segundo Glossop (1961), o tratamento por injeção de caldas à base de cimento na barragem de Hoover entre 1932 e 1935 marcou, definitivamente, o início da sistematização do projeto de tratamentos de maciços rochoso nos Estados Unidos.

Desde então, o desenvolvimento das técnicas de tratamento de maciços rochosos por injeção de caldas de cimento tem mantido um ritmo acelerado, encontrando-se documentado em diversas publicações temáticas.

O recurso ao uso de materiais químicos no processo de injeção teve início na primeira década do século XX, quando o engenheiro belga François (Xanthakos *et al.*, 1994) desenvolveu um processo, designado de “silicatização”, onde uma solução de sulfato de alumínio e silicato de sódio era injetada no terreno antes da calda de cimento. No entanto, pensava-se na altura que a solução injetada serviria apenas de lubrificante, não se apercebendo que formava também uma calda, química, capaz de preencher pequenos poros e fissuras, permitindo assim à calda de cimento ganhar presa normalmente sem ser diluída ou arrastada pela circulação de água no interior do maciço.

Desde então, o desenvolvimento tem prosseguido, principalmente no sentido da descoberta de novos materiais, reativos com água, de durabilidade elevada e ambientalmente aceitáveis, sendo que também no início do século passado, houve um renovado interesse nas caldas de cimento microfinas (DePaoli *et al.*, 1992) e em todo o conceito de reologia das caldas relacionado com a eficácia das injeções (Lombardi e Deere, 1985).

O interesse demonstrado em conferências, como as realizadas pela *International Comission on Large Dams* (ICOLD) , ou pela *American Society of Civil Engineers* (ASCE) e literatura recente (Weaver e Bruce, 2007), confirmam que a área das injeções em geral, e de permeação em particular, continua a ser um tópico dinâmico, desafiante e em evolução.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Os temas abordados nesta dissertação foram divididos em cinco capítulos, seguindo-se uma breve descrição destes.

No Capítulo 1, introduzem-se os objetivos propostos para esta dissertação, apresentando-se um breve resumo dos aspetos gerais relacionados com o tratamento de impermeabilização de fundações rochosas de barragens, bem como a evolução histórica das injeções de caldas de cimento em maciços rochosos.

No Capítulo 2, são abordados os objetivos das injeções de permeação, os vários tipos possíveis de serem realizados em maciços de fundações rochosas, bem como os diferentes tipos de caldas e seus constituintes utilizados atualmente, seguido de um resumo das suas características. Efetua-se ainda uma abordagem às fases de projeto de uma cortina de impermeabilização e a todos os aspetos que o integram.

No Capítulo 3 foca-se particularmente no dimensionamento da própria cortina e nos procedimentos executivos que implica. É abordada também a temática de controlo de qualidade da empreitada, dando-se especial atenção às fases anteriores à injeção e ao seu desenrolar.

No Capítulo 4 sumarizam-se as principais metodologias de dimensionamento mais difundidas e defendidas por autores consagrados aplicadas a cortinas de impermeabilizações, detalhando-se as suas características e os respetivos parâmetros a definir.

O Capítulo 5, onde é abordado o caso de estudo, compreende um breve enquadramento geológico-geotécnico da Barragem da Apartadura, bem como os zonamentos de projeto. Descreve-se, em

seguida, a metodologia original aplicada na construção da cortina de impermeabilização e, após a realização das adaptações necessárias e devidamente justificadas, aplica-se o método GIN, caracterizado no capítulo anterior. Os resultados dessa aplicação são então sumarizados e discutidos.

Finalmente, no Capítulo 6, encontram-se incluídas as principais conclusões da dissertação, nomeadamente as obtidas da aplicação da metodologia GIN ao dimensionamento de uma cortina de impermeabilização numa fundação rochosa, bem como algumas sugestões para desenvolvimentos futuros de investigação.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas consultadas no decorrer desta dissertação e os anexos que a complementam.

2. INJEÇÕES DE PERMEAÇÃO EM FUNDAÇÕES ROCHOSAS DE BARRAGENS

As injeções de caldas à base de cimento são um procedimento considerado versátil para a melhoria de terrenos aplicável a maciços rochosos com fracas características geotécnicas, em particular hidráulicas, sendo que a maioria dos avanços neste campo advêm da experiência *in situ*.

Apresenta-se, neste capítulo, alguns conceitos básicos ligados a este tratamento de terrenos, como é o caso dos seus objetivos e dos diferentes tipos de injeções existentes. Serão abordadas também os diferentes tipos de caldas disponíveis no mercado atualmente, com especial ênfase das caldas à base de cimento. Finalmente, apresentam-se os aspectos gerais de anteprojeto e projeto relacionados com a execução de uma cortina de impermeabilização.

2.1. OBJETIVOS DAS INJEÇÕES DE PERMEAÇÃO EM MACIÇOS ROCHOSOS

Praticamente todas as rochas apresentam defeitos geológicos que afetam, não só a capacidade de percolação da água, mas também a sua resistência. A natureza e extensão desses defeitos variam e são influenciados por vários fatores particulares a cada maciço rochoso, tais como:

- A sua origem;
- A sua idade;
- A história das tensões a que foi submetido.

As falhas, descontinuidades e planos de estratificação, por outro lado, são características mais gerais desses terrenos. Embora esses elementos possam ser estanques e com pouco significado, em muitos casos são de dimensões suficientes para afetarem e determinarem, por si só, a condutividade hidráulica e a resistência/deformabilidade de um maciço rochoso.

No caso de maciços rochosos de origem vulcânica, é comum a existência de grandes canais subsuperficiais, enquanto que em maciços constituídos por rochas solúveis, como é o caso de calcários, a dissolução de minerais como o carbonato de cálcio, anidrite ou gipsite, resultam na formação de cavidades, por vezes de dimensões consideráveis.

São todos estes defeitos, independentemente das suas dimensões, que são o alvo do melhoramento dos maciços através da injeções de permeação, de modo a tornar possível a construção de um variado número de estruturas. Caracterizam-se, seguidamente, alguns dos objetivos dessa melhoria.

2.1.1. Redução de caudais

A redução de caudais continua a ser o principal motivo para o recurso às injeções de permeação nos maciços rochosos. Em muitos dos casos é pretendida uma redução permanente, como é na construção de cortinas de impermeabilização sob barragens, figura 2.1, ou o impedimento de entrada de água num túnel ou qualquer outra escavação.

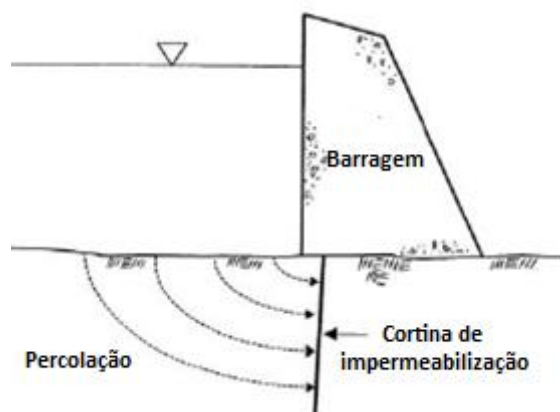


Figura 2.1 - Cortina de impermeabilização e o seu papel em diminuir o gradiente hidráulico (adaptado de Warner, 2004)

No entanto, o controlo da circulação de água pode ser apenas temporário, de modo a permitir a execução de determinados trabalhos. Os casos mais comuns encontram-se relacionados com a atividade mineira, onde muitas vezes é apenas necessário controlar a circulação de água, enquanto uma galeria é aberta abaixo do nível freático, ou quando se pretende minimizar fenómenos de levantamento hidráulico, durante a abertura de poços verticais ou outras escavações mineiras.

2.1.2. Aumento da capacidade resistente

Quanto um maciço rochoso se encontra muito diaclasado ou fraturado, um tratamento por injeção de caldas à base de cimento para preenchimento dessas fraturas pode devolver ao maciço as características geotécnicas que este apresentava antes de sofrer fracturação:

- Melhorar a sua capacidade resistente e diminuir a sua deformabilidade.
- Acessoriamente, diminuir também o caudal de água.

Outra das funções do tratamento por injeções é a de reforçar o terreno sob e adjacente a pilares de fundação de obras. Em muitos dos casos o intuito do tratamento é uma combinação de controlo da

circulação de água e reforço do maciço, sendo isto particularmente verdade quando o tratamento é realizado como um auxiliar da construção de estruturas no subsolo.

2.1.3. Enchimento de cavidades de dissolução

Os vazios subsuperficiais são comuns, como referido, em calcários e outras rochas solúveis. Quando estes são suficientemente grandes, o terreno sobrejacente pode colapsar, resultando em abatimentos à superfície, também chamados de dolinas.

Embora os vazios de grandes dimensões sejam, por vezes, descobertos durante a realização da caracterização geotécnica, na maioria dos casos os abatimentos ocorrem subitamente, sob ou adjacente a estruturas existentes. Em qualquer dos casos, é necessário o seu preenchimento, de modo a prevenir abatimentos futuros, o que é geralmente conseguido através da injeção de caldas espessas no terreno instabilizado. No caso do volume previsto a injetar exceder $2,3-3,8 \text{ m}^3$, é economicamente mais viável recorrer ao uso de argamassas para encher as cavidades (Warner, 2004).

2.2. TIPOS DE INJEÇÃO DE PERMEAÇÃO NA FUNDAÇÃO DE BARRAGENS

Independentemente da metodologia adotada, existem essencialmente dois tipos de injeções que podem ser realizados em barragens com fundações em maciços rochosos. São eles as injeções de consolidação e as de impermeabilização que se passam a caracterizar sucintamente.

2.2.1. Injeções de consolidação

Os termos anglo-saxónicos ***blanket grouting*** e ***consolidation grouting*** são utilizados em português como sinónimos em relação ao tratamento de fundações de barragens em maciços rochosos. Embora ambos os tipos de tratamento sejam realizados a profundidades relativamente pequenas, em regra até à quinzena de metros, ao longo de áreas a montante e jusante da cortina de impermeabilização, os seus objetivos são distintos (Weaver e Bruce, 2007). Caracterizam-se de seguida essas diferenças.

a) Blanket grouting

Este termo deve ser reservado para definir injeções superficiais realizadas sob barragens de aterro, cujos objetivos são reduzir:

- Perdas de água por percolação;
- As velocidades de percolação em zonas relativamente permeáveis a pequena profundidade;
- A probabilidade de arraste e perda de material constituinte do núcleo da barragem.

De modo a atingir os dois primeiros objetivos, a profundidade dos furos realizados dependerá da espessura da zona permeável sendo que, para alcançar o terceiro e último objetivo, são realizados furos mais superficiais em conjunto com um tratamento à superfície, que inclui o uso de betão de regularização.

No caso de barragens de aterro relativamente impermeáveis, fundadas em maciços rochosos muito permeáveis, é significativa a necessidade de execução, em superfície, de um tratamento de injeção minucioso e efetivo. Isto porque, segundo Wilson e Dreese (1998), naquelas circunstâncias existe a tendência para se desenvolverem pressões intersticiais elevadas nas zonas a montante da barragem, criando uma percolação potencial sob a cortina de impermeabilização, causando a hidrofracturação dos materiais constituintes da barragem, e gerando um gradiente de fluxo descendente sob a barragem, para o interior do maciço de fundação. A execução deste tratamento, quando considerado apropriado, baseado nas condições da fundação, é geralmente confinado ao núcleo de barragens de aterro.

b) Consolidation grouting

Neste caso a designação em inglês deve ser utilizada quando se pretende referir a injeções realizadas sob barragens de betão, onde a perda de materiais constituintes do núcleo não é um problema (Weaver e Bruce, 2007).

O objetivo principal deste melhoramento é de aumentar a capacidade resistente da fundação de modo a reduzir a probabilidade de ocorrência de assentamentos que, de outra forma, poderiam ocorrer como resultado do fecho de fissuras previamente abertas, devido às ações impostas pela obra.

Ambos os tipos de tratamento são geralmente realizados num padrão geométrico dependendo, no entanto, das condições geológicas, pode ser mais apropriado e conveniente dispor os furos em fiadas paralelas à cortina de impermeabilização. Na maioria dos casos, será benéfico realizar os furos em direções opostas, em fiadas alternadas, de modo a aumentar a probabilidade que características

geológicas planares (falhas e descontinuidades, entre outras) paralelas aos furos de uma determinada fiada sejam intersectadas por furos de fiadas adjacentes. Em qualquer dos casos, as especificações de projeto devem mencionar a possível necessidade de execução de furos fora do padrão definido para cortarem defeitos geológicos observados ou inferidos.

Este tipo de injeção é realizado em toda a área de fundação da barragem, geralmente com uma grelha de furos primários espaçados 3 m entre si, exceto em zonas onde as características geológicas locais exigem um tratamento especial.

No caso das injeções de consolidação, as profundidades máximas de tratamento não ultrapassam os 10 m para pequenas barragens e 20 m para as grandes (Londe e Le May, 1993). No entanto, existem casos especiais, como o de uma barragem de aterro com 85 m de altura, na região oeste de Nova Jérсия, nos Estados Unidos da América, onde este tipo de tratamento atingiu profundidades da ordem de 30 m devido à ocorrência de condições extremamente adversas na fundação.

2.2.2. Cortinas de impermeabilização

As cortinas de impermeabilização, objeto desta dissertação, são realizadas de modo a impedir a circulação de água sob barragens ou outras estruturas, ou apenas reduzi-la até um ponto que possa ser controlada, segura e economicamente, por métodos de drenagem. O controlo dessa circulação é atingido através da execução de uma ou mais fiadas de furos na fundação de uma barragem, usualmente paralelos ao alinhamento da barragem ou perpendiculares ao sentido de escoamento da água. A cortina é então executada, preenchendo as fissuras do maciço com calda à base de cimento ou outro material, como referindo em 2.3.

Teoricamente, a cortina necessita apenas de ser de uma determinada largura, sendo que em termos práticos aquela que é obtida será superior à necessária em algumas zonas e, possivelmente, não o suficiente em outras, devido à variação das condições geológicas subsuperficiais.

Estas barreiras impermeáveis podem ser constituídas por apenas uma fiada de furos ou por um conjunto de múltiplas fiadas (cortinas de contenção). No caso de uma barragem de betão assente num maciço rochoso competente, uma cortina de fiada única será suficiente na maioria dos casos, sendo posicionada o mais a montante possível, enquanto que em barragens de aterro, a cortina situar-se-á a montante ou sob a zona impermeável do respetivo corpo. Assim, a localização exata das cortinas é determinada pelo tipo de estrutura a construir e, também, pelas condições de fundação particulares da área em causa.

Quando na presença de maciços rochosos menos competentes, é geralmente necessária a furação de fiadas adicionais, devendo estas ser escalonadas entre si. A distância entre fiadas pode variar de acordo com as características do terreno, mas geralmente não ultrapassa 1,5 m (USACE, 1984).

2.3. TIPOS DE CALDAS

Como foi mencionado anteriormente (ver secção 1.1.), a necessidade de reabilitar zonas previamente consideradas menos adequadas para a construção de barragens tem vindo a ganhar cada vez mais importância o que, em conjunto com avanços nas tecnologias de furação e injeção, significa que as barragens são atualmente fundadas em maciços que necessitam de tratamentos mais específicos e que apresentam uma maior variação nas suas características hidromecânicas. Como consequência, o leque de diferentes tipos de materiais constituintes das caldas de injeção existentes também se tornou mais extenso.

Em seguida serão apresentados os comportamentos típicos dos diferentes tipos de caldas existentes, bem como um resumo das características associadas e a sua aplicabilidade.

2.3.1. Fluidos newtonianos e binghamianos

Dependendo da sua composição, as caldas podem exibir comportamentos semelhantes a fluidos newtonianos ou binghamianos, como ilustrado na figura 2.2. Nos primeiros, a tensão de corte, isto é, a força necessária para movimentar o líquido, é apenas condicionada pela viscosidade dinâmica. Por outro lado, os fluidos binghamianos apresentam coesão, também conhecida como tixotropia, bem como viscosidade dinâmico-plástica.

Fluidos como a água, ditas soluções verdadeiras, apresentam um comportamento newtoniano, enquanto que caldas estáveis se comportam como fluidos binghamianos. A viscosidade, isto é, a relação entre a tensão e a taxa de corte, de fluidos binghamianos pode ser mantida constante, mas pode mudar em resposta à tendência de um material para espessar ou se tornar mais fino conforme aquela taxa aumenta. Esta alteração é geralmente referida como espessamento de corte ou adelgaçamento de corte, respetivamente.

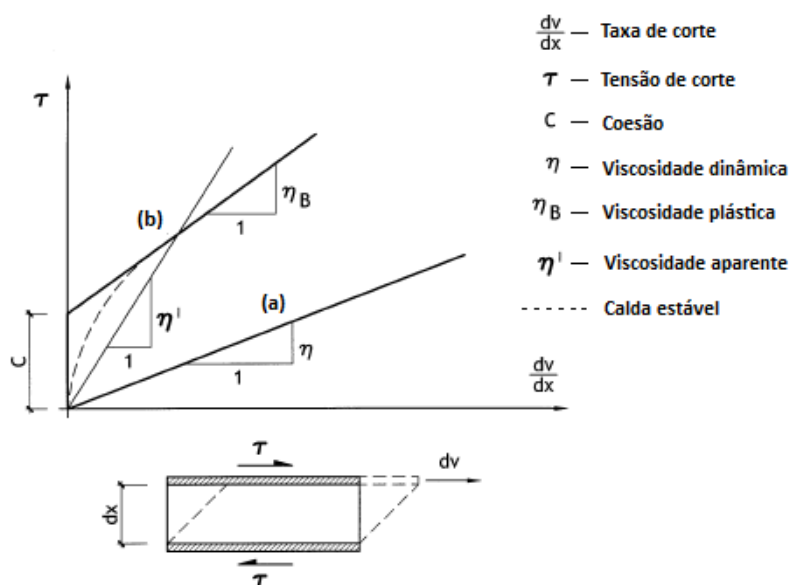


Figura 2.2 - Modelos reológicos de (a) fluidos newtonianos e (b) binghamianos (adaptado de Lombardi, 2003)

Tendo em conta os diferentes comportamentos que as caldas podem apresentar, Bruce *et al.* (1997) agruparam estas em três categorias, podendo ou não ser considerada a existência de uma quarta, listando-as por ordem crescente segundo as suas características reológicas e custo de aplicação:

- I. **Caldas ou suspensões particuladas** (caldas à base de cimento), que apresentam um comportamento binghamiano. Nesta categoria encontram-se misturas de água com um ou mais tipos de sólidos particulados, como cimento, argilas ou areias e, dependendo da sua composição, podem ser estáveis ou instáveis. Sendo as caldas à base de cimento as mais utilizadas no tratamento de maciços rochosos (Bruce *et al.*, 1999), nomeadamente em cortinas de impermeabilização, será dada especial atenção a este tipo particular de calda nesta dissertação.

Dentro desta categoria podem ser ainda identificadas algumas subcategorias:

- **Caldas de cimento puras**, geralmente instáveis, exceto quando apresentam relações água:cimento (A/C) inferiores a 0.4:1. Encontram-se associadas a resistência e durabilidade elevadas, sendo os valores exatos dependentes da quantidade de água utilizada e da dimensão dos grãos e constituição química do cimento;
- **Caldas de cimento com bentonite**, são estáveis, graças à adição da argila. Para além disso, esta adição confere ainda uma série de propriedades à calda (ver seção 2.3.1.1);

- **Caldas com fillers.** A adição de materiais não cimentícios modifica as propriedades da calda e reduz os custos da mistura. Os materiais adicionados são, na sua maioria, areias e/ou cinzas volantes, ou seja, subprodutos inertes de indústria;
 - **Caldas para aplicações específicas,** cuja reologia e evolução da hidratação são controladas pela adição de aditivos (ver seção 2.3.1.1).
- II. **Soluções coloidais,** são fluídos newtonianos evolutivos, cuja viscosidade aumenta com o tempo. São também conhecidas como caldas químicas, sendo diferenciadas das soluções puras pela química dos seus componentes. Estas soluções são constituídas à base de silicatos de sódio e soluções reagentes (orgânicas ou inorgânicos) que irão criar géis, mais ou menos duros, dependendo das concentrações utilizadas para a sua realização.
- III. **Soluções puras,** são também fluidos newtonianos, mas cuja viscosidade é constante até ganhar presa, dentro de um determinado intervalo de tempo. Igualmente conhecidas como caldas químicas, distinguem-se das anteriores por terem como base resinas. Outro aspeto em comum com as soluções coloidais é o facto de serem raramente utilizadas em tratamentos de maciços rochosos, recorrendo-se principalmente à sua utilização em injeções em zonas com elevado caudal de percolação (*ib.*).
- IV. **Outros materiais.** Nesta categoria encontram-se um variado grupo de caldas constituídas por materiais pouco comuns, geralmente compostos orgânicos e resinas como *epoxies*, silicones e latex. Estes materiais são utilizados apenas em certas indústrias e mercados, quando são necessárias caldas com características específicas, tais como resistência particular à erosão ou corrosão e flexibilidade (*ib.*).

Na figura 2.3 é possível observar o comportamento reológico característico de cada uma das três categorias de caldas.

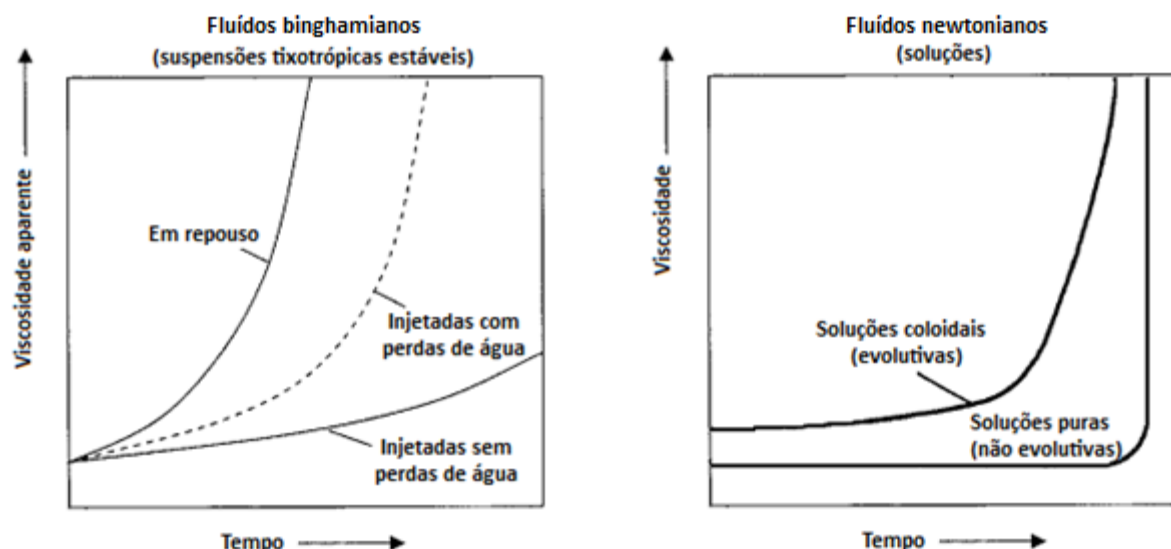


Figura 2.3 - Comportamento reológico dos diferentes tipos de calda (adaptado de Bruce *et al*, 1997)

2.3.1.1. Aplicabilidade das caldas à base de cimento

De modo a ser possível projetar adequadamente uma calda para qualquer aplicação específica, é necessário ter conhecimento das propriedades exigidas a essa calda. Por exemplo, caldas com o objetivo de reduzir a permeabilidade e/ou aumentar a resistência de maciços fraturados devem atingir uma combinação ótima de penetrabilidade, durabilidade, economia e resistência (Weaver e Bruce, 2007).

Ambos os tipos de caldas químicas (soluções coloidais e puras) são, em termos teóricos, capazes de oferecer uma maior capacidade de penetração a qualquer pressão de injeção sendo, no entanto, relativamente dispendiosas quando comparadas com as caldas à base de cimento, e a sua durabilidade e/ou toxicidade são muitas vezes questionáveis (*op. cit.*).

Graças às suas características e economia de utilização, as caldas à base de cimento são aquelas a que mais se recorrem para tratamentos de impermeabilização e de consolidação (Bruce *et al.*, 1999). Devido à sua elevada utilização, estas são também as caldas que mais evoluíram nos últimos anos.

Tradicionalmente, as caldas à base de cimento eram constituídas apenas por cimento e água, sendo outros materiais, como areia ou aceleradores de presa, utilizados apenas em condições extremas. Atualmente é comum a utilização de caldas estáveis, cujas características são definidas por variações na quantidade de água e pelo tipo de cimento utilizado, bem como pela adição de aditivos e adjuvantes.

Existem atualmente vários tipos de cimento disponíveis para diferentes utilizações. Estes variam entre cimentos com diferentes gradações das partículas, diferentes tempos de presa ou com formulações químicas específicas para serem resistentes a determinados tipos de ataques químicos. Na tabela 2.1 são apresentados os diferentes tipos de cimento utilizados, com uma breve descrição das suas composições.

Tabela 2.1 - Caracterização dos diferentes tipos de cimento utilizados atualmente (adaptado de IPQ, 2001)

Notação	Tipos	Constituição
CEM I	Portland	Um único constituinte principal - clínquer
CEM II	Portland composto	Pelo menos dois terços ($\geq 65\%$) de clínquer
CEM III	De alto forno	Clínquer e (35-95%) de escórias de alto forno
CEM IV	Pozolânico	$\geq 45\%$ de clínquer e restante sílica de fumo, pozolana ou cinzas volantes
CEM V	Composto	Pelo menos 20% de clínquer e pelo menos 18% de escórias

Com base em vários anos de experiência, Houlsby (1990) sugeriu os seguintes valores mínimos de aberturas de descontinuidades possíveis de serem injetadas, sob condições de tratamento típicas, com caldas à base de cimento Portland:

- 500 μ , para injeções realizadas sem qualquer cuidado especial;
- 400 μ , com cuidados especiais e utilizando caldas de qualidade elevada;
- Microcimento, mais finas, quando a injeção é supervisionada por profissionais experientes.

Na tabela 2.2 encontra-se um resumo das dimensões dos grãos dos cimentos e das descontinuidades possíveis de injetarem.

Tabela 2.2 - Dimensão dos grãos de cimento e respetiva penetrabilidade (adaptado de IPQ, 2001 e Multiurethanes, 2010)

Tipo de cimento	D ₉₅ da calda (μ)	Abertura das descontinuidades (μ)
CEM I	80-100	> 400
De elevada resistência inicial (classe R)	40-60	> 200
Microcimento	10-12	> 50

A manutenção de um balanço entre os impactos positivos e negativos dos diferentes materiais adicionados à formulação de uma calda é um dos aspectos mais importantes a ter em conta ao longo do processo de formulação de qualquer calda. Na tabela 2.3 encontra-se um resumo dos vários materiais possíveis de adicionar à formulação de caldas à base de cimento, com uma breve descrição dos seus efeitos e da sua dosagem usual.

Tabela 2.3 - Resumo dos vários aditivos, fillers e adjuvantes possíveis de utilizar na produção de caldas à base de cimento, bem como os seus efeitos e dosagem típica (adaptado de Chuaqui, 2006)

Materiais	Descrição	Efeitos	Dosagem típica
Superplastificantes	Vários	Reduzem a viscosidade da calda através da inibição da capacidade de aglomeração de partículas	0,5% a 2%
Bentonite	Montmorilonite de sódio	Estabilizam a calda, aumentam a sua resistência à pressofiltração e viscosidade	Inferior a 5%
Cinzas volantes	As de tipo C e F são materiais pozolânicos	Aumentam a resistência das caldas à pressofiltração, bem como a durabilidade da calda após a cura	Variável
Micro sílica	Pó microfino (< 1 μ)	Aumentam a resistência das caldas à pressofiltração e a durabilidade e resistência das caldas após a cura	Inferior a 10%
Agentes tixotrópicos	Vários, geralmente argilas	Aumentam significativamente a resistência das caldas à pressofiltração e conferem características tixotrópicas às caldas	0,1% a 0,2%
Agentes hidrófobos	Vários	Aumentam a resistência das caldas ao arraste por percolação, reduzem o coeficiente de pressofiltração e conferem características tixotrópicas às caldas	0,2% a 1%
Controladores de hidratação	Aceleradores, retardadores e inibidores de hidratação	Permitem o controlo do processo de hidratação e a manipulação do início de presa	Variável

2.3.2. Reologia de caldas à base de cimento

A reologia é a ciência que trata do fluxo dos materiais, incluindo estudos sobre a deformação de betão endurecido, o manuseamento e aplicação de cimento recém-misturado e o comportamento de lamas, argamassas e caldas. Especificamente, a reologia de uma calda particulada é um estudo complexo, Houlsby (1990) refere que “as partículas de cimento atuam de uma forma físico-química difícil de entender”, no entanto pode ser sumariado por três parâmetros: viscosidade, coesão e atrito interno.

As pressões de injeção, as aberturas de fraturas e as dimensões de partículas equivalentes, bem como a viscosidade controlam a velocidade e penetrabilidade da calda e, portanto, o tempo de injeção, enquanto que a coesão condiciona a pressão interna necessária para iniciar ou reiniciar o fluxo de calda. A coesão controla também a distância máxima de penetração. O atrito interno entre os componentes sólidos irá, quando suficientemente elevado, bloquear as descontinuidades que se encontram a ser injetadas, devido aos requisitos exponenciais de pressão necessários para movimentar a calda através daquelas.

Estas características podem ser aplicadas a misturas estáveis, visco-plásticas (Lombardi, 1985), o que significa que o controlo da reologia de uma calda através da redução da sua coesão inicial e atraso do seu aumento com o tempo irá aumentar significativamente a sua penetrabilidade. No entanto, ao contrário de caldas à base de soluções, cuja penetrabilidade depende quase exclusivamente da sua viscosidade, as de cimento apresentam vários mecanismos de controlo da mesma (Weaver e Bruce, 2007).

Estas caldas são então designadas de **caldas de mobilidade elevada** (*High Mobility Grout, HMG*) tendo como características principais (Chuaqui e Bruce, 2003):

- Reologia controlável;
- Decantação mínima;
- Capacidade superior de resistência a pressofiltração;
- Maior penetrabilidade e durabilidade.

Existem ainda as **caldas de baixa mobilidade** - LMG (Byle, 1997), que apresentam *slumps* muito reduzidos, frequentemente <25 mm, e um atrito interno elevado. As LMG são também designadas de caldas espessas para compactação, uma vez que são utilizadas na densificação de solos.

A aplicação de um conjunto de HMG num determinado projeto deve ser realizada em três fases (Chuaqui e Bruce, 2003). Durante a primeira fase uma série de formulações devem ser desenvolvidas através de um programa de ensaios laboratoriais. Estas formulações irão refletir as condições conhecidas do terreno e são usualmente baseadas em caldas obtidas em projetos anteriores.

Na segunda fase de desenvolvimento, já no campo e antes da sua produção em massa, são realizadas algumas caldas para ensaio, com o objetivo de identificar possíveis alterações nas características destas devido a diferenças nos materiais, no equipamento de mistura ou nos procedimentos entre os ensaios de laboratório e a produção das caldas. É nesta fase que a informação base para o programa de controlo de qualidade é definida (ver seção 3.5.1).

Finalmente, na terceira fase, durante a produção da calda, algumas das suas características são avaliadas regularmente, de modo a assegurar que estas estão a ser efetuadas corretamente e que as misturas continuam a ser consistentes com as características da zona a injetar.

Seguidamente, sucede uma breve introdução ao comportamento reológico de caldas à base de cimento, bem como uma listagem dos principais parâmetros a ter em conta na utilização de HMG, embora a importância de cada parâmetro varie consoante a aplicação desejada.

2.3.2.1. Viscosidade

A viscosidade de qualquer suspensão é determinada pela relação A/C utilizada na sua elaboração e pelo conteúdo e natureza dos *fillers* e aditivos presentes, sendo alterada pelo tempo de hidratação em resposta à energia aplicada e à temperatura durante o processo de mistura, bem como pelas características das reações de hidratação do cimento.

A viscosidade de uma calda estável pode permanecer relativamente constante por um período de 2 a 3 h, até ao início da presa, aumentando rapidamente até à sua conclusão. O uso de aditivos controladores de hidratação pode afetar bastante estes valores médios, bem como a existência de temperaturas extremas (Kutzner, 1996).

2.3.2.2. Coesão e tixotropia

O termo coesão foi introduzido por Lombardi (1985) e é também utilizado como um indicador da tixotropia. O *United States Department of Transport* (Corven e Moreton, 2004) define tixotropia como a “propriedade de um material endurecer num curto espaço de tempo enquanto em repouso, adquirindo uma viscosidade mais reduzida quando agitado mecanicamente, sendo este processo reversível”.

O valor daquele parâmetro (figura 2.4) é portanto uma medida indireta do grau de tensão de corte ou pressão necessária para iniciar (ou reiniciar) o fluxo de fluido.

Tendo como exemplo o caso de caldas de cimento puras (figura 2.5), é possível observar que a coesão aumenta com a redução da relação A/C, até ao ponto em que, para caldas com coesão elevada, as respetivas propriedades tixotrópicas irão ser mais importantes do que o desempenho reológico.

Como a velocidade de escoamento da calda é inversamente proporcional à sua viscosidade, muitos técnicos de injeção têm sido tentados a usar caldas com relações A/C elevadas. No entanto, vários ensaios realizados demonstraram que, para caldas mais finas do que aquelas com uma relação 2:1, as alterações na viscosidade das mesmas são escassas (Weaver e Bruce, 2007).

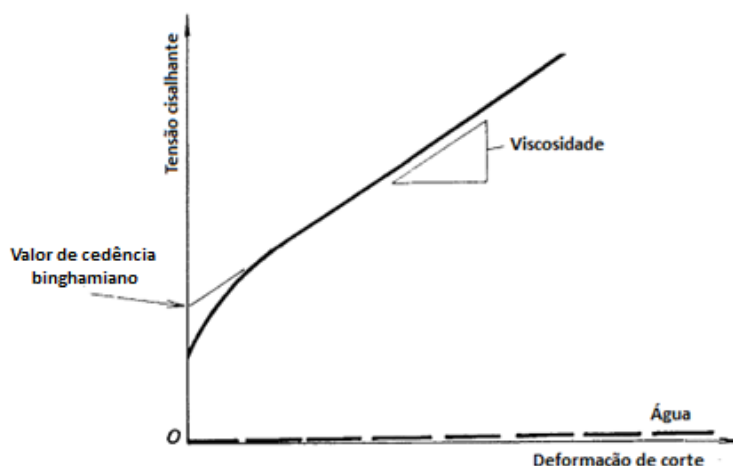


Figura 2.4 - Conceito de tixotropia (adaptado de Houlsby, 1990)

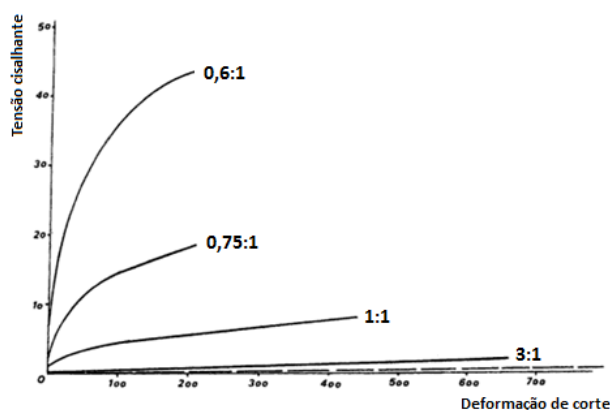


Figura 2.5 - Comparação da tixotropia de caldas de cimento puras (adaptado de Houlsby, 1990)

Mais importante ainda é o facto de que as caldas puras, com relações inferiores àquelas, apresentam exsudação excessiva e características de pressofiltração muito pobres. Estudos efetuados sobre a eficácia de tratamentos implementados em várias barragens mostraram que cortinas de impermeabilização construídas com caldas com relações não inferiores a 2:1 eram mais eficazes do que aquelas que tinham sido efetuadas com caldas mais finas (*op. cit.*).

2.3.2.3. Decantação

As partículas sólidas individuais numa calda de cimento em repouso tendem a assentar devido à ação da gravidade, a uma velocidade que é função do tamanho das suas partículas, bem como da

respetiva forma e densidade. No caso de partículas esféricas, como é o caso de cinzas volantes, essa velocidade é governada pela lei de Stoke.

Para qualquer relação A/C, a decantação é minimizada através da utilização de misturadores coloidais de velocidade e pressões elevadas. O desenvolvimento potencial de exsudação de caldas de cimento puras encontra-se relacionado, principalmente, com a finura do cimento e a relação A/C, encontrando-se a alteração da finura identificada, pela adição de bentonite, na figura 2.6. A velocidade de exsudação aumenta proporcionalmente com a relação A/C (figura 2.7), enquanto que o respetivo tempo diminui proporcionalmente com ela.

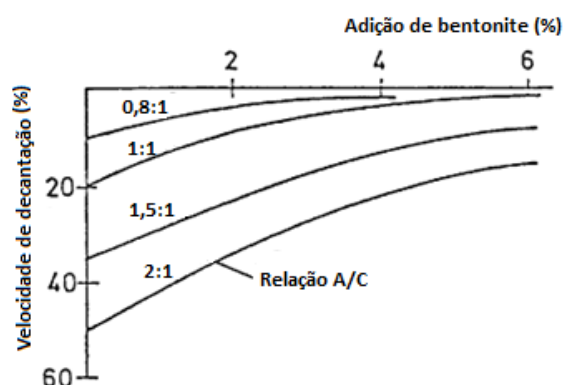


Figura 2.6 - Velocidades médias de decantação de diferentes caldas à base de cimento com diferentes relações A/C (adaptado de Kutzner, 1996)

A percentagem de exsudação tem um efeito importante no preenchimento pleno de discontinuidades: a água que não é removida durante a injeção da calda não é absorvida pelo maciço, não faz parte da estrutura cristalina da calda endurecida, nem participa nas reações químicas que induzem o seu endurecimento. Aquela água cria então bolsadas dentro da calda endurecida, tornando-a relativamente porosa, permeável e suscetível a fenómenos de dissolução e erosão. Caldas consideradas estáveis apresentam uma taxa de decantação inferior a 5%, sendo valores na ordem dos 2%, ou menos, cada vez mais requisitados (Weaver e Bruce, 2007).

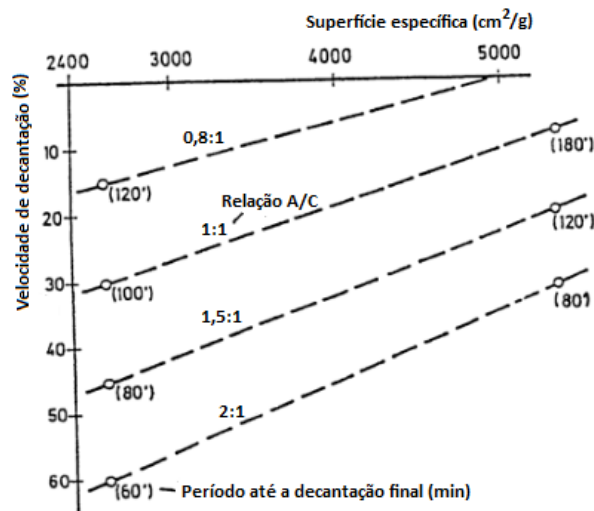


Figura 2.7 - Velocidades médias de decantação de caldas à base de cimento (adaptado de Kutzner, 1996)

Embora, no passado, caldas com aqueles valores de exsudação não tenham sido consideradas reologicamente aptas para injeções a pressões baixas de descontinuidades finas, com a adição de bentonites e outros aditivos, é agora possível serem obtidos valores de coesão reduzidos.

2.3.2.4. Pressofiltração

A injeção de caldas à base de cimento em descontinuidades com aberturas reduzidas é semelhante a pressionar a calda contra um material filtrante. Assim, dependendo da formulação da calda, a água pode ser expelida da calda em movimento, levando ao desenvolvimento da sedimentação da argamassa de cimento nas paredes do furo. Com o passar do tempo, esta argamassa irá bloquear a entrada nas descontinuidades, obliterando injeções futuras.

A tendência da calda para perder água durante a injeção é quantificada pelos termos “coeficiente de pressofiltração” (K_{pf}), e “coeficiente de crescimento do cake” (K_{pc}) (De Paoli *et al.*, 1992). Estes parâmetros podem ser calculados através das seguintes equações (*op.cit.*):

$$K_{pf} = \frac{V_f}{V_i} \times t^{-\frac{1}{2}} \text{ (min}^{-1/2}\text{)} \quad (2.1)$$

$$K_{pc} = h \times t^{-\frac{1}{2}} \text{ (mm x min}^{-1/2}\text{)} \quad (2.2)$$

Onde :

- V_f = Volume do filtrado (ml)
- V_i = Volume inicial da amostra (ml)
- h = Espessura do cake (mm)
- t = Duração do ensaio (min)

De modo a aumentar a penetrabilidade de uma determinada calda é necessário que esta apresente um baixo K_{pc} de modo a minimizar o aumento da viscosidade aparente (coesão e viscosidade real) associada.

Como já foi mencionado anteriormente, a coesão de uma calda pode ser reduzida através da adoção de relações A/C elevadas; no entanto, a mistura resultante irá apresentar um elevado K_{pf} , o que significa que essa mistura apresentará uma penetrabilidade reduzida (*ib.*). De Paoli *et al.* (*op.cit.*) apresentaram uma possível solução, na qual combinam a utilização:

- De volumes de água reduzidos;
- Adjuvantes estabilizadores e plastificantes;
- Aditivos.

Esta metodologia torna possível a criação de caldas com baixa viscosidade, exsudação mínima e com valores de K_{pf} aceitáveis. Para pressões de injeção moderadas, estas caldas apresentam uma elevada capacidade de penetração e eficácia apresentando (*ib.*):

- Maior mobilidade;
- Maior volume específico, com o preenchimento uniforme de discontinuidades;
- Maior capacidade resistente à erosão.

2.3.2.5. Outros aspetos

Para além dos aspetos já abordados, as caldas à base de cimento apresentam ainda outras características que devem ser consideradas para a sua formulação, resumidos na tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Parâmetros importantes nas suspensões

Parâmetro ou propriedade	Descrição
Dimensão e forma dos grãos	A dimensão e forma dos grãos constituintes de uma calda está diretamente relacionada com a injectabilidade da mesma. Mitchell (1981) apresentou a seguinte fórmula: RI (relação de injectabilidade) = largura da descontinuidade / (D_{95}) da calda Se RI > 5, a injeção será possível e se RI < 2, a injeção será impossível; A adição de determinados <i>fillers</i> pode alterar a injectabilidade da calda.
Fenómenos de agregação de partículas	O fator determinante da capacidade de penetração de uma calda é a dimensão máxima das partículas sólidas constituintes da mesma. Caso haja formação de aglomerados dessas partículas durante o processo de mistura da calda, a sua eficácia ficará comprometida. Como tal, é necessária a utilização de adjuvantes de modo a prevenir e mitigar estes fenómenos.
Segregação do filler	Para HMG que contenham areias como um dos seus constituintes, é essencial que estas se mantenham em suspensão e distribuídas uniformemente. Caso contrário, a areia não se ligará com a restante matriz da calda, segregando-se e tornando a calda difícil de bombear.
Porosidade da matriz	Caldas cuja porosidade da matriz seja reduzida, apresentam uma maior durabilidade, devido à maior dificuldade de penetração da água (Littlejohn, 1982). Esta propriedade torna-as adequadas para aplicações onde sejam necessárias baixas permeabilidades ou elevadas resistências a ataques químicos.
Hidrofobia	Quando uma calda é injetada abaixo do NF, a tendência para esta se diluir na água deve ser minimizada. Caso contrário a eficácia do tratamento será reduzida e poderá ocorrer a contaminação de aquíferos próximos. Esta característica é geralmente controlada pela adição de adjuvantes.
Controlo da hidratação	A capacidade de controlo do tempo de presa é fundamental. Em casos de injeção em zonas com circulação de água, é preferível um tempo de presa reduzido para evitar a lavagem da calda. Por outro lado, quando é necessária a reinjecção de um trecho, tempos de presa mais elevados são preferíveis. Esta característica é controlada pela adição de aditivos (tabela 2.3).
Endurecimento da calda	O processo de endurecimento tem início imediatamente após a mistura da calda. Os parâmetros que mais influenciam a velocidade do processo são a temperatura, o tipo de cimento, o teor de superplastificantes utilizados, a relação A/C e a agitação da calda. Esta característica é controlada pela adição de adjuvantes.

2.4. ANTEPROJETO DA CORTINA

Segundo Houlsby (1990), antes de se proceder ao dimensionamento da cortina de injeção de uma barragem para uma dada área, é aconselhável investigar um volume suficiente do maciço que irá servir de fundação de modo a obter-se informação que permita definir as características da calda a injetar, bem como a quantidade dessa mesma calda que irá ser necessário utilizar.

Uma metodologia de estudo adequada deve contemplar os seguintes pontos:

- Minimizar o nível de incerteza presente em todos os trabalhos de injeção;
- Obter informação suficiente para que seja possível avaliar a necessidade de eventual tratamento;
- Conseguir informação indicativa sobre o tipo de calda mais adequada (cimento, química, argilas, ou combinações);
- Recolher elementos que permitam o dimensionamento das injeções;
- Avaliar dados suficientes para a realização de um caderno de encargos apropriado;
- Construir uma base de comparação para o que possa vir a ocorrer durante a execução do tratamento.

Embora as caracterizações necessárias possam ser dispendiosas, acabam por poupar dinheiro a longo prazo, pois permitem que as injeções sejam realizadas com maior exatidão e ajustando-se de forma mais adequada às condições do maciço, existindo então um menor desperdício de material.

É possível concluir então que o estudo preliminar do maciço de fundação é um passo fundamental para a execução do projeto de tratamento eficaz, sendo que existem dois aspetos fundamentais a focar nesse estudo: a geologia e a condutividade hidráulica do maciço, abordados em seguida.

2.4.1. Estudo das características geológicas locais

Embora existam semelhanças nos padrões de comportamento dentro de cada tipo de maciço rochoso, a extensão real dos defeitos e das suas propriedades variam infinitamente. Para que um projeto de tratamento seja eficaz, é necessário que se tenha um conhecimento do tipo, orientação e condição dos defeitos existentes na formação a tratar o que requer, usualmente, uma prospeção extensa, incluindo a cartografia do terreno e a execução de ensaios dentro dos furos.

A prospeção e caracterização geotécnica deve proporcionar informação sobre a orientação, frequência e condições das várias falhas e outros defeitos, de modo a selecionar uma malha de furos apropriada.

Salienta-se a importância de uma avaliação minuciosa da prospeção realizada por parte de geólogos de engenharia ou engenheiros geólogos com experiência, pois a eficácia de qualquer tratamento encontra-se totalmente dependente de conhecimento adequado do subsolo.

De seguida será efetuado um resumo dos aspetos mais importantes a considerar aquando da realização deste tipo de estudo.

2.4.1.1. Tipo de litologia e sua estrutura

Como é de conhecimento geral, a composição e comportamento dos três tipos principais de rochas, ígneas, sedimentares e metamórficas, diferem bastante. Embora sejam expectáveis variações entre os diferentes tipos, a natureza dos defeitos também irá variar em termos de extensão e características dentro de rochas do mesmo tipo e/ou idade.

Como referido anteriormente, a idade geológica da formação e sua história tectónica subsequente, permitem ao especialista obter uma ideia das principais características do maciço, sendo o estado de meteorização, a abertura das fissuras e sua orientação algumas das mais importantes.

O estado de meteorização de uma rocha pode modificar as respetivas superfícies e induzir a cimentação das descontinuidades, em consequência da desintegração das rochas devido à exposição aos agentes atmosféricos e/ou à sua dissolução por percolação de água. O material erodido pode ser transportado para as fissuras, acumulando-se nelas e impedindo a penetração das caldas injetadas.

As superfícies de descontinuidade são afetadas pelo tipo litológico e estado de meteorização, podendo ser completamente lisas ou, inversamente, muito rugosas, e ambas as configurações afetam a capacidade das caldas penetrarem nelas.

2.4.1.2. Orientação das fraturas

A atitude das principais fraturas em qualquer terreno deve ser conhecida de modo a permitir uma distribuição e posicionamento corretos dos furos de injeção de modo a estes intersectarem o maior número possível de defeitos. Embora furos verticais sejam mais fáceis de efetuar e de controlar as suas trajetórias, estes não irão ser eficazes se não intersectarem as principais famílias de

descontinuidades existentes. Devido a esse facto, furos inclinados irão ser necessários em muitas aplicações, sendo que a inclinação selecionada pode variar em função da complexidade do sistema de fraturas. Em casos que existam muitos tipos de defeitos e/ou orientações, é necessária a execução de furos com diferentes inclinações.

A orientação das descontinuidades também dita a gama de pressões que podem ser usadas com segurança durante as injeções. Como é possível observar na figura 2.8, fissuras horizontais irão ser sujeitas a forças de levantamento hidráulico a partir de pressões mais reduzidas do que fissuras verticais, pelo que a definição da pressão de injeção máxima admissível depende das propriedades da rocha e da geometria e orientação dos defeitos existentes na área a tratar.

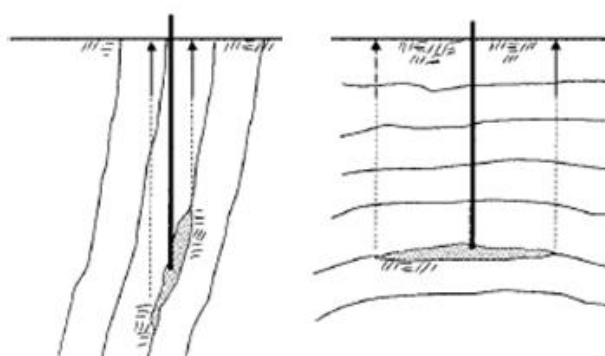


Figura 2.8 - Pormenor da influência da atitude das descontinuidades nas forças de levantamento hidráulico geradas na sequência das injeções (adaptado de Warner, 2004)

2.4.1.3. Características das fraturas

A capacidade de penetração das caldas injetadas em fissuras depende da respetiva abertura, do seu espaçamento e da sua rugosidade. O grau de interligação entre os vários defeitos existentes no maciço tem também uma grande influência na distância que a calda é capaz de percorrer, sendo portanto condicionado pela persistência das descontinuidades. Estes fatores devem ser considerados de modo a determinar o espaçamento ideal entre furos, a composição da calda adequada, e quaisquer limitações ao volume de calda injetado (Warner, 2004).

As caldas irão obviamente viajar mais facilmente por vazios de grandes dimensões do que pelos pequenos, da mesma maneira que viajarão mais facilmente através de uma superfície lisa e regular do que por uma ondulada e rugosa. A resistência imposta à movimentação das caldas varia tanto quanto a diversidade dos defeitos existentes, não existindo quaisquer regras que sejam aplicáveis a todos os casos possíveis de encontrar. Na tabela 2.5, é possível observar as distâncias percorridas por uma calda à base de cimento sob diferentes condições físicas das fissuras.

Tabela 2.5- Distâncias percorridas por uma calda de cimento com relação A/C de 1 em fissuras com diferentes aberturas, para uma pressão de injeção de 690 kPa (adaptado de Warner, 2004)

Condição das fissuras	Aberturas das fissuras (mm)			
	1.58	3.17	6.35	12.7
Superfície lisa e húmida	2.7 m	4.5 m	9 m	30 m
Superfície rugosa e seca	1.5 m	2.4 m	6 m	24 m

Como foi mencionado anteriormente, a interligação entre os vários defeitos tem uma grande influência na capacidade de penetração das caldas: grandes fissuras interligadas serão geralmente capazes de receber grandes quantidades de calda facilmente, permitindo às vezes que esta penetre para além das áreas que se pretende atingir, sendo necessário portanto o controlo da penetrabilidade das caldas utilizadas, geralmente através da modificação das relações A/C destas.

É neste cenário que devem ser impostos limites ao volume de calda injetado, sendo a sua validade totalmente dependente das dimensões dos defeitos. Nas fases iniciais do tratamento devem ser recolhidos tarolos suficientes após as injeções iniciais de modo a assegurar que as limitações impostas sejam razoáveis (Silva Gomes, 1991). Este aspeto pode também ser avaliado durante a perfuração de furos adjacentes, podendo no entanto ser ainda necessária a execução de furos de confirmação adicionais.

Embora a penetração excessiva das caldas injetadas possa ser um problema, as redes de defeitos interligados que estão na origem desse mesmo problema são substancialmente mais fáceis de preencher do que um conjunto de vazios mais pequenos, não conectados entre si. O tratamento daquelas redes de defeitos interligados apresenta também a melhor relação custo/benefício para as injeções realizadas, quando o objetivo destas é o melhoramento das características do terreno ou o controlo da percolação (Warner, 2004).

2.4.1.4. Hidrologia e escoamento subterrâneo

Sempre que o controlo da percolação de água for o motivo do recurso à utilização do tratamento, é importante conhecer e compreender o regime hidráulico aéreo e a condutividade entre as várias descontinuidades presentes no terreno. Este conhecimento implica a execução de ensaios de bombagem, ou pelo menos, de absorção de água tipo Lugeon, em furos no âmbito da prospeção geotécnica do terreno, em particular na fase de projeto, pelo que serão detalhados na seção seguinte.

2.5. ASPETOS GERAIS DE PROJETO

Apresentam-se seguidamente aspetos a definir no contexto da fase de projeto de uma cortina de impermeabilização e que incluem desde os requisitos e interpretação dos ensaios tipo Lugeon, passando pela definição dos critérios de fecho de injeção até à averiguação da necessidade de execução de galerias de injeção no maciço.

2.5.1. Ensaios de absorção de água

A determinação da profundidade necessária de tratamento da fundação de uma barragem encontra-se diretamente relacionada com a condutividade hidráulica dos maciços rochosos envolvidos. Como tal, a seleção de um valor representativo para ela assume particular importância durante o projeto, pois devido à sua grande variabilidade, a adoção de um valor médio a partir das medições obtidas não será suficiente. Uma vez estimados os valores de condutividade hidráulica, podem ser construídas redes de percolação através de vários métodos numéricos, sendo os de elementos finitos ou das diferenças finitas os mais utilizados atualmente.

Ao contrário de solos, onde a percolação de água ocorre através de uma série de pequenos poros interligados, em maciços rochosos a percolação ocorre maioritariamente ao longo de descontinuidades, como fendas, fissuras, etc. Portanto, enquanto que em solos a condutividade hidráulica é controlada principalmente pelo tamanho, forma e organização dos seus vazios (Terzaghi *et al.*, 1996), em maciços rochosos aquele depende da abertura, espaçamento e características do preenchimento das suas descontinuidades (Goodman, 1980).

A abertura das descontinuidades, em particular, tem um papel importante na condutividade hidráulica de maciços rochosos. Consequentemente, alterações no estado de tensão do maciço podem produzir modificações significativas na sua permeabilidade. A existência de uma inter-relação entre estes dois parâmetros significa que as realizações de estimativas precisas da condutividade hidráulica de um maciço rochoso podem apenas ser obtidas através da execução de, pelo menos, ensaios de absorção de água sob pressão *in-situ*.

O ensaio *in-situ* mais utilizado para estimar a condutividade hidráulica de maciços rochosos é o ensaio de absorção de água sob pressão tipo Lugeon, figura, 2.9, abreviadamente designado de “ensaio tipo Lugeon”. Este ensaio, cujo nome tem origem no seu inventor, o geólogo suíço Maurice Lugeon (1933, *in* Quiñones-Rozo, 2010) consistia, na sua versão original, na medição do caudal de

escoado através de um trecho de ensaio com 5 m de comprimento, durante 10 min, sob uma pressão de 1 MPa.

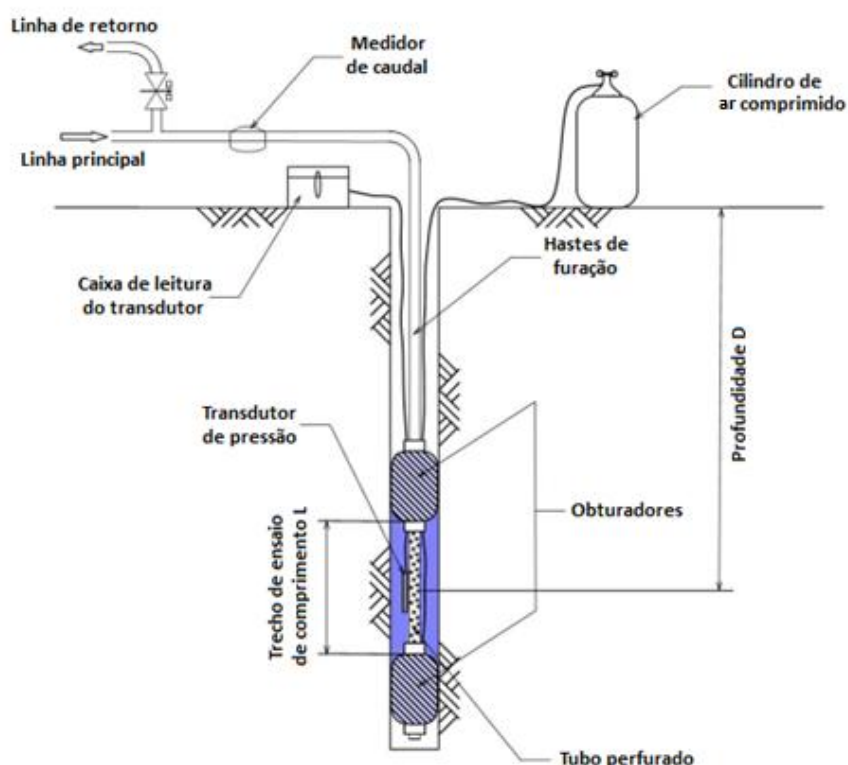


Figura 2.9 - Esquematização do ensaio tipo Lugeon com obturador duplo (adaptado de Quiñones-Rozo, 2010)

2.5.1.1. Evolução do ensaio tipo Lugeon

Desde a sua invenção, o ensaio original tem sido submetido a várias modificações, entre as quais se destacam:

- a) A adaptação do comprimento do trecho de ensaio às características de fracturação do maciço. Esta modificação teve como objetivo possibilitar a execução de ensaios em trechos que apresentem características análogas. No caso de existirem zonas do maciço com descontinuidades com aberturas e enchimentos muito diferentes, o que implica diferentes condutividades hidráulicas, é importante distingui-las. Isto porque, a estas situações, correspondem condições muito diferentes de injectabilidade de caldas (Silva Gomes, 1991).

Segundo Oliveira (1983), cada ensaio deve intersectar pelo menos meia dúzia de descontinuidades para que os valores obtidos possam ser considerados como uma resposta global do maciço. Para tal, Oliveira (*op. cit.*) recomenda a utilização de trechos de 3 m de comprimento quando na presença de maciços medianamente (F_3) a muito fraturados (F_{4-5}), e de 5 m para maciços pouco fraturados (F_{1-2});

- b)** A introdução de vários patamares de pressão, com o objetivo de obter informações relativas a eventuais modificações dos regimes de escoamento e comportamento das fraturas a partir da curva pressão/caudal de ensaio;
- c)** A adaptação dos valores de pressão utilizados às condições do maciço, uma vez que as pressões críticas características de cada trecho do maciço são influenciadas por um conjunto de fatores como a profundidade do trecho, a geometria da compartimentação do maciço e as características mecânicas das formações. No caso de trechos mais superficiais, a utilização da pressão típica, 1 MPa, do ensaio tipo Lugeon poderia causar a fracturação hidráulica do maciço, sendo que em trechos mais profundos a mesma pressão poderá ser muito inferior à pressão crítica (Silva Gomes, *op. cit.*).

2.5.1.2. Execução do ensaio tipo Lugeon

Antes de iniciar o ensaio, deve ser definida uma pressão máxima (P_{MAX}). Essa pressão deve ser escolhida de modo a não exceder as pressões de confinamento (σ_1) expectáveis à profundidade a que o ensaio será realizado, evitando-se assim o desenvolvimento de fenómenos de fracturação ou levantamento hidráulico.

Regra geral, P_{MAX} é geralmente calculada através da equação 2.3 (Quiñones-Rozo, 2010),

$$P_{MAX} = D \times 22,6 \text{ kPa/m} \quad (2.3)$$

onde D corresponde à cobertura de terreno mínima – profundidade para o caso de um furo vertical realizado num local plano, ou recobrimento lateral mínimo no caso de ensaios realizados numa encosta.

O ensaio é realizado em estádios, com diferentes pressões associadas a cada um deles. Cada estádio consiste na manutenção de uma pressão de água constante em todo o trecho de ensaio durante 10 min, bombeando a quantidade de água que for necessária para manter o escoamento em regime permanente. Realizam-se, no mesmo trecho de ensaio, ciclos de carga e descarga (geralmente com 3 a 5 estádios, correspondendo a 2 ou 3 patamares de pressão) apresentado uma configuração do tipo a-b-c-b-a. Na tabela 2.6 são apresentadas as magnitudes de pressão mais utilizadas durante a execução do ensaio.

Durante a execução de cada estádio, os valores referentes à pressão de água (P) e caudal (Q) são registados em cada minuto. Subsequentemente, valores médios de P e Q são utilizados no cálculo da condutividade hidráulica de cada estádio.

Tabela 2.6 – Relação entre os patamares de pressão utilizados num ensaio tipo Lugeon (adaptado de Houlby, 1976)

Estádio de ensaio	Descrição	Patamar de pressão
1º	Baixa	1/4 P _{Máx}
2º	Média	1/2 P _{Máx}
3º	Máxima	P _{Máx}
4º	Média	1/2 P _{Máx}
5º	Baixa	1/4 P _{Máx}

Essa condutividade é expressa em unidades Lugeon (Lu), definidas como a condutividade hidráulica necessária para atingir um caudal de 1 l.min⁻¹ e por metro de trecho ensaiado, a uma pressão de injeção de 1 MPa (equação 2.4).

$$1 \text{ Lu} = \frac{Q}{L} \times \frac{P_0}{P} \quad (2.4)$$

Sob condições ideais, isto é, em maciços homogêneos e isotrópicos, o valor de 1 Lu é equivalente a uma condutividade de 1,3x10⁻⁵ cm.s⁻¹ (Fell *et al.*, 2005). Na tabela 2.7 encontram-se resumidas as condições tipicamente associadas com diferentes valores de absorção em Lu, bem como a exatidão a utilizar para relatar esses valores.

Tabela 2.7 - Condições das descontinuidades do maciço rochoso associadas a gamas de valores de absorção em Lu (adaptado de Houlby, 1976)

Intervalo de valores Lu	Absorção	Condutividade hidráulica (m.s ⁻¹)	Condição das descontinuidades do maciço rochoso	Exatidão no relato dos resultados (Lu)
< 1	Muito baixa	< 1 x 10 ⁻⁵	Muito fechadas	< 1
1 - 5	Baixa	1 x 10 ⁻⁵ - 6 x 10 ⁻⁵	Fechadas	± 0
5 - 15	Moderada	6 x 10 ⁻⁵ - 2 x 10 ⁻⁴	Algumas parcialmente abertas	± 1
15 - 50	Média	2 x 10 ⁻⁴ - 6 x 10 ⁻⁴	Algumas abertas	± 5
50 - 100	Alta	6 x 10 ⁻⁴ - 1 x 10 ⁻³	Muitas abertas	± 10
> 100	Muito alta	> 1 x 10 ⁻³	Abertas e pouco espaçadas ou com vazios	> 100

Uma vez determinados os valores de absorção para cada um dos três/cinco estádios do ensaio, um valor representativo da condutividade hidráulica do trecho ensaiado é selecionado, baseado na tendência observada ao longo do mesmo.

2.5.1.3. Interpretação dos resultados

A prática atual de interpretação de ensaios tipo Lugeon é baseada nos trabalhos realizados por Housby (1976) e revista recentemente por (Quiñones-Rozo, 2010). No trabalho mais antigo, direcionado para a definição de requisitos para a execução de tratamento por injeções, Housby (*op. cit.*) propôs que os valores representativos de condutividade hidráulica deveriam ser selecionados com base na observação do comportamento dos valores de absorção, em Lu, calculados para os diferentes estádios definidos no decorrer do ensaio (tabela 2.8), classificando os comportamentos típicos observados no seu desenrolar em cinco grupos diferentes.

Tabela 2.8 - Síntese da interpretação dos ensaios Lugeon (modificado de Quiñones-Rozo, 2010)

Comportamento	Patamares de pressão	Padrão dos valores Lugeon	Descrição	Valor Lugeon representativo
Regime laminar			Todos os valores Lugeon são aproximadamente iguais independentemente das pressões de injeção utilizadas	Média de valores Lugeon de todos os estádios de ensaio
Regime turbulento			Valores Lugeon decrescem com o aumento da pressão de injeção. O valor mais baixo ocorre para a pressão mais alta	Valor Lugeon correspondente à pressão de injeção mais elevada (3º estádio)
Abertura elástica das fraturas			Valores Lugeon variam proporcionalmente com a pressão de injeção. O valor mais alto ocorre para a pressão mais alta	Valor Lugeon correspondente à média do par de pressões com valores Lugeon mais baixos (1º, 2º, 4º e 5º estádios)
Lavagem das fraturas			Valores Lugeon aumentam com o desenrolar do ensaio. O preenchimento das descontinuidades é progressivamente lavado pela água	Valor Lugeon mais elevado (5º estádio)
Colmatação das fraturas			Valores Lugeon diminuem com o desenrolar do ensaio. Verifica-se um preenchimento das descontinuidades abertas pelos materiais carregados pelo fluxo de água.	Valor Lugeon final (5º estádio)

2.5.1.4. Limitações do ensaio

Uma das principais limitações do ensaio tipo Lugeon é que apenas um volume muito limitado do maciço, na envolvente do furo, é efetivamente ensaiado. Foi estimado por Bliss e Rushton (1984 *in*

Quiñones-Rozo, 2010) que o efeito de um ensaio Lugeon realizado num trecho de ensaio com 3 m se encontra restrito a um raio de, aproximadamente, 9 m à volta do furo. Esta estimativa sugere que o valor de condutividade hidráulica estimada por este ensaio é apenas representativo de um cilindro de rocha delimitado pelo comprimento do trecho de ensaio e pelo raio identificado anteriormente (*op. cit.*).

Embora o recurso ao uso de ensaios de bombagem associados a furos de observação possa suplantar esta limitação (Cedergren, 1989 *in* Quiñones-Rozo, 2010), tais ensaios são raramente realizados, pois envolvem a execução de furos adicionais que irão aumentar consideravelmente o custo do projeto.

Devido a estas limitações espaciais, não é recomendável a estimação de condutividades hidráulicas usando soluções analíticas fechadas, que se baseiem na premissa que uma grande área do maciço é envolvida durante a execução dos ensaios. Para além disso, estas soluções analíticas requerem um conhecimento adequado da localização do nível freático presente. No entanto, é geralmente observado que as medições do nível freático durante a execução dos furos podem ser artificialmente elevadas devido às grandes quantidades de água injetadas inicialmente durante a sua limpeza.

Como foi identificado por Hoek e Bray (1974 *in* Quiñones-Rozo, 2010), muitas das teorias matemáticas existentes na literatura evoluíram para lá das aplicações práticas. Na maior parte dos casos práticos, as condições assumidas pelos métodos matemáticos não correspondem às condições do maciço rochoso a ser estudado, como por exemplo fluxo laminar através de um meio contínuo, homogêneo e isotrópico, ou os parâmetros necessários para as equações não podem ser facilmente estimados ou quantificados. Devido a estas limitações, é recomendável evitar um excesso de dependência nestes métodos analíticos e limitar o seu uso para efetuar análises que possam ser usadas para validar os resultados obtidos através da equação 2.4.

2.5.2. Definição do critério de fecho da injeção

Na execução de cortinas de impermeabilização, as injeções dão-se como terminadas quanto são atingidos um ou mais critérios determinados, podendo estes por vezes ser definidos, ou não, *à priori*. De seguida, descrevem-se alguns dos critérios de fecho mais utilizados atualmente.

2.5.2.1. O conceito de “nega”

Considera-se que um furo atinge a “nega” quando o caudal injetado nele desce até um determinado valor durante um certo intervalo de tempo. No entanto, está longe de ser atingido um consenso em relação a quais são esses valores.

Alguns peritos na técnica consideram que se deve considerar atingida a “nega” quando a velocidade de injeção decresce para valores na ordem dos 28 l durante um período de 5 a 15 min. Outros argumentam que o sistema de injeção deve ser mantido ligado e pressurizado por algum tempo após a cessação de toda a bombagem (Warner, 2004).

Segundo Houlsby (1990), a pressão deve ser mantida por um período de 15 min após a “nega” ter sido atingida, qualquer que seja a definição do termo em uso. A sua justificação consiste no facto que a manutenção da pressão irá manter a calda firmemente no sítio até que ocorra um enrijecimento tixotrópico e ela se torne resistente à circulação de água, prevenindo assim o seu arrastamento.

Weaver (1991), refere que o *California Department of Water Resources* usa um critério de “nega” semelhante, e cita Bussey (1973): “É muito importante continuar o bombeamento da calda enquanto se registre alguma absorção em qualquer intervalo de 10 min.”

É de salientar, no entanto, que todas estas autoridades usam tradicionalmente caldas instáveis, que se encontram sujeitas ao assentamento das partículas sólidas e fenómenos de exsudação consideráveis. Através da manutenção da pressão de injeção durante um certo intervalo de tempo após a absorção de calda ter aparentemente terminado, muita da água proveniente dos fenómenos de exsudação irá ascender, podendo ser de seguida removida, como é referido por Houlsby (1990). O espaço que esta água ocupava previamente poderá ser então preenchido por nova calda injetada, compensando-se assim, em alguma medida, o seu comportamento instável.

Warner (2004) considera as caldas instáveis antiquadas e o seu uso futuro inadequado, sugerindo que, para caldas estáveis, a “nega” deve ser qualquer ponto da injeção onde não existam valores de absorção de calda mensuráveis durante um curto espaço de tempo (1 a 5 min).

2.5.2.2. Critério de condutividade hidráulica

De um ponto de vista prático não é viável a adoção de um critério de permeabilidade inferior a 1 Lu, o que equivale a ter um maciço com uma permeabilidade da ordem de $1,3 \times 10^{-5}$ cm/s. Segundo Nonveiller (1968), é extremamente difícil baixar a permeabilidade de um maciço fraturado de 10^{-5} cm/s para 10^{-6} cm/s através do uso de caldas à base de cimento convencionais, referindo que seriam necessárias velocidades de bombagem reduzidas, pressões elevadas e um espaçamento entre furos mínimo, de modo a ser possível realizar tal tratamento, e que a sua eficácia seria reduzida.

No entanto, se os valores de condutividade hidráulica extremamente reduzidos forem essenciais para a barragem em estudo, é possível atingi-los recorrendo a caldas especificamente desenhadas para o efeito. As *nuances* envolvidas na utilização de tais caldas já foram abordadas na seção 2.3.1.1.

A aplicação destes critérios, baseados na permeabilidade, implica a execução de ensaios de permeabilidade em cada trecho de cada furo, e a verificação de que está a ser atingida uma redução progressiva da permeabilidade em estágios sucessivos da sequência de injeção, para além da observação dos resultados, através da execução de mais ensaios de tipo Lugeon num número limitado de furos de verificação.

Houlsby (1976) recomenda que os valores de absorção de água devem mostrar uma redução significativa quando se tiver um espaçamento entre furos de 1,5 m, e indica que não será necessária a execução de mais injeções caso os valores de condutividade hidráulica pretendidos estejam a ser atingidos. Por outro lado, se os valores não estiverem a ser atingidos, deve ser realizado um estudo especial, de modo a averiguar o motivo. Segundo aquele autor (*op. cit*):

“Condições geologias pouco usuais, ou a utilização de uma técnica pouco apropriada são causas possíveis do problema. As ações de remediação a considerar podem incluir a execução de mais furos, no entanto quando o espaçamento entre eles atingir 0,75 m ou menos, o critério de fecho deixa de ser tão importante, passando a ser necessária a procura de fraquezas individuais na fundação, envolvendo a utilização de furos com orientações muito diferentes dos anteriores.”

Silva Gomes por sua vez defende a utilização de drenos neste mesmo caso, posicionados de modo a intersear as descontinuidades existentes.

No caso da construção de cortinas impermeáveis com o objetivo de reduzir caudais elevados de percolação em maciços cárnicos, a validade das análises dos rácios de redução de caudal é posta em causa, particularmente para furos primários e secundários. Mesmo assim, os dados obtidos dos ensaios tipo Lugeon e das análises acima mencionadas podem ter alguma validade em furos de ordem mais elevada, a partir do momento que as cavidades cárnicas sejam tratadas.

2.5.2.3. Critério de absorção de calda

Os critérios para concluir a injeção de caldas baseados em valores de absorção de calda são mais fáceis de aplicar aritmeticamente do que outros baseados em permeabilidade, e têm sido amplamente usados no lugar de critérios mais definitivos.

Deere (1976 *in* Warner, 2004) criou um sistema de classificação simples, conveniente de aplicar com este objetivo, tabela 2.9. Subsequentemente, Deere (1982 *in op. cit.*) aplicou esse sistema, em conjunto com outros fatores, para sugerir um conjunto de limites superiores de absorção de calda para furos secundários em função da profundidade (tabela 2.10).

Tabela 2.9- Sistema de classificação proposto por Deere (1976, adaptado de Warner, 2004)

Classificação	Absorção de calda (kg/m)	Símbolo
Muito baixa	0 - 12,5	VL
Baixa	12,5 - 25	L
Moderadamente baixa	25 - 50	ML
Moderada	50 - 100	ML
Moderadamente alta	100 - 200	MH
Alta	200 - 400	H
Muito alta	> 400	VH

Tabela 2.10 - Critério de absorção para furos secundários sugerido por Deere (1982, adaptado de Warner, 2004)

Trecho (m)	Absorção de calda (kg/m)	Classificação
0 - 10	25	L
10 - 20	34	ML
20 - 30	50	ML
> 30	100	M

Bruce (1982) apresentou um exemplo de uma obra em Inglaterra onde valores de absorção de calda baixos, como definidos por Deere (1976 *in op. cit.*) foram adotados como valores alvo para a definição da conclusão do tratamento, e na qual reduções nos caudais de percolação na ordem de 25% a 75% eram pretendidos.

Houslby (1982) apresentou os seguintes valores como sendo típicos para critérios de fecho do tratamento em termos de quantidade de cimento injetado num determinado furo:

- 35 kg/m no primeiro trecho;
- 46 kg/m no segundo trecho;
- 70 kg/m em trechos subsequentes.

No entanto, Houslby (*op. cit.*) menciona ainda que, em casos onde foi possível a realização de comparações, as cortinas de impermeabilização construídas segundo estes critérios apresentavam

valores de permeabilidades superiores a 10 Lu. Como estes ainda são valores elevados de permeabilidade, a utilização de apenas este critério não é francamente aconselhável.

Como Houlsby (*op. cit.*) não indica valores para o comprimento dos vários trechos, uma comparação direta dos seus valores com os de Deere (1982 *in ib.*) não é possível. No entanto, pode ser inferido que a aderência ao critério deste autor poderia produzir uma cortina ligeiramente mais impermeável nas zonas superiores, uma cortina de permeabilidade idêntica a profundidades intermédias e uma cortina mais permeável para profundidades mais elevadas.

É de salientar que os valores de absorção de calda e quaisquer variações destes podem, na melhor das hipóteses, ser indicativas do sucesso ou não em concluir o tratamento, e que existem muitos outros fatores, para além da injeção de todas as fissuras, que podem produzir resultados aparentemente satisfatórios em termos da absorção de calda pelo maciço. Portanto, a observação de uma redução progressiva dos valores de absorção de calda não deve ser considerada como prova de que a permeabilidade do maciço foi satisfatoriamente reduzida.

2.5.2.4. Critério geológico

A construção de cortinas impermeáveis, particularmente no que diz respeito a cortinas de fiada única e da fiada inicial de cortinas de fiadas múltiplas, é em grande parte um procedimento exploratório. É necessário ter sempre em mente que a definição do espaçamento inicial dos furos primários e secundários é baseado, na melhor das hipóteses, na experiência do projetista, bem como numa avaliação preliminar da influência que as características geológicas do maciço terão na distância e direção que a calda irá percorrer a partir dos furos, sendo geralmente improvável que esse caminho seja radial.

A suposição mais perigosa que se pode fazer então, durante a construção de uma cortina, é que um valor de absorção de calda mais reduzido num determinado furo, em relação a um outro tratado previamente, significa que se tenha atingido o fim do tratamento. Particularmente, durante o início do trabalho, é de vital importância avaliar a importância geológica da absorção de calda (ou a sua falta) em cada furo e nos seus intervalos.

As condições de furação encontradas nos furos iniciais e em cada furo de ordem superior podem providenciar pistas importantes em relação às condições geológicas e ao impacto progressivo dos tratamentos. A absorção de calda por parte de qualquer furo pode ser o resultado da intersecção de

uma zona fraturada, um plano de estratificação aberto, da intersecção de duas ou mais famílias de descontinuidades ou ainda de um sistema de vazios.

Qualquer barragem situada num talvegue encontra-se em princípio sobre algum tipo de anomalia geológica que contribui para o desenvolvimento dos caminhos preferenciais de percolação. Assim, e até que seja provado o contrário, é prudente assumir que a posição e orientação do vale ao longo do qual a barragem se encontra a ser construída é condicionada pela atitude de algum tipo de lineação ou de outras anomalias.

Nessa base, é seguro assumir que um valor de absorção de calda elevado, em qualquer furo, pode ser o resultado dele ter intersectado um grupo de eventuais fissuras, localizadas, o que significa que a zona deve ser investigada através da diminuição do espaçamento entre furos.

A decisão acerca da alteração do espaçamento e da profundidade dos furos de modo a obter um tratamento adequado deve ser baseada, em grande parte, na análise dos ensaios de permeabilidade e de injectabilidade em conjunto com a examinação de um perfil geológico construído através da análise de uma cartografia geológica superficial e dos dados existentes sobre a geologia em profundidade, nomeadamente da análise dos tarolos de sondagem.

2.5.3. Galerias de injeção

No decorrer do projeto de grandes barragens de aterro, deve ser sempre considerada a viabilidade de inclusão de galerias nos seus encontros e na fundação. Do uso de galerias advêm uma série de possíveis vantagens, incluindo (Weaver e Bruce, 2007):

- a) O tratamento pode continuar nos meses de Inverno em zonas frias, sem a preocupação da ocorrência de congelamento do terreno e sem os riscos de segurança e pouca eficiência associados com operações em tempo frio;
- b) O tratamento não necessita de ser interrompido após a reabertura do canal do rio;
- c) A sequência de construção da barragem é simplificada e os atrasos mais comuns evitados devido às respetivas empreitadas serem independentes;
- d) Possibilidade de utilização de pressões mais elevadas, promovendo uma maior eficácia do tratamento, podendo ser reduzida a quantidade total de furação a realizar;
- e) Tanto a furação como a injeção de furos pode ser realizada a diferentes profundidades, mitigando a possibilidade de ocorrência de desvios, bem como reduzindo os custos de tratamento de zonas permeáveis mais profundas;

- f) As cortinas de impermeabilização podem ser mais facilmente executadas para lá do eixo da barragem através da utilização conjunta das galerias e de furos em leque, ou pela furação através do maciço envolvente de modo a atingir as zonas necessárias de tratar para lá do corpo da barragem;
- g) A definição do programa de injeção pode ser menos conservativa ou inclusive ser retardado até que dados referentes à percolação existente ou registos da instrumentação indiquem a necessidade de execução desta; isto porque as galerias permitem um acesso permanente ao maciço de fundação;
- h) O acesso ao maciço é importante caso haja necessidade de inspeção deste ou da execução de furos adicionais, nomeadamente de drenagem no caso da instalação de subpressões.

Londe & Le May (1993) recomendam a construção das galerias em zonas superficiais da fundação, ao longo do eixo da barragem, de modo a permitirem a monitorização da percolação existente bem como de possíveis fenómenos de erosão. Para tal aconselham o uso de pré-corte para a escavação das zonas onde serão instaladas as galerias. No caso de barragens de betão, estas galerias encontram-se por vezes ligadas com outras situadas nos encontros e realizadas no âmbito dos estudos de prospeção para o projeto.

Como resultado da sua longa lista de vantagens, as galerias são atualmente utilizadas internacionalmente. Já Bozovic (1985), no XV Congresso Internacional das Grandes Barragens (ICOLD), referiu que um grande número de especialistas apoiava a tendência crescente de construção das galerias nas fundações ou na zona de contacto entre o maciço central e a fundação de barragens de aterro; isto porque, com o aumento da altura das barragens, a execução de tratamentos após a construção destas torna-se mais difícil, especialmente caso o núcleo seja inclinado.

A avaliação da necessidade de construção de galerias sob o núcleo das barragens é então um aspeto importante a ter em consideração no projeto.

2.6. ASPETOS EXECUTIVOS DOS FUROS PARA TRATAMENTO DE FUNDAÇÕES

Quase todos os métodos de injeção de caldas, em solos ou maciços rochosos, envolvem a execução de furos de modo a providenciar um caminho para a calda aceder aos vazios e outros defeitos existentes. Um número suficiente de furos deve ser realizado e espaçado de modo a atingirem todas as formações que se pretendem tratar. Embora furos verticais sejam mais fáceis de realizar e mais

baratos, é importante que os furos intersectem e penetrem quaisquer defeitos que necessitam de ser preenchidos, o que às vezes requer a execução de furos inclinados (figura 2.10).

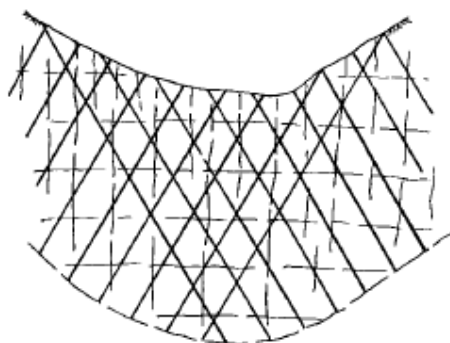


Figura 2.10 - Pormenor da zona central de uma cortina de impermeabilização com interseção dos furos inclinados no fundo do vale (adaptado de Houlsby, 1990)

No traçado dos furos em projeto, a distância efetiva percorrida pela calda deve ser considerada. Essa distância irá variar de acordo com as propriedades do maciço a tratar e do tamanho, configuração, interligação e outros atributos do sistema de vazios, falhas ou descontinuidades existente.

Uma localização correta dos furos é fundamental para a eficácia de um tratamento e, embora existam variações nos métodos e materiais utilizados na execução de tratamentos por injeção de caldas, existem fundamentos que se aplicam a todos os métodos. Apresentam-se, em seguida, aspetos relativos à execução dos furos.

2.6.1. Técnicas de furação

Em teoria, os principais fatores técnicos a ter em conta na escolha da técnica de furação são os seguintes:

- Litologia a perfurar;
- Profundidade e diâmetro do furo a realizar;

Outros aspetos, como a linearidade dos furos e os acessos à zona de furação, podem também ter um impacto significativo na escolha em qualquer projeto. Tendo em conta estes aspetos, existem três técnicas principais para a execução de furos em maciços rochosos que a seguir se descrevem: à rotação, à rotopercussão e, internacionalmente, rotovibração.

2.6.1.1. Rotação

Neste método de avanço são utilizadas velocidades de rotação elevadas (≥ 600 rpm), torque baixo e pressões baixas na cabeça de furação, podendo ser utilizadas plataformas de furação relativamente leves para extrair amostras do maciço usando um amostrador adequado. Também se pode recorrer a coroas com diferentes tipos de revestimento ou brocas destrutivas para avançar.

Segundo Kutzner (1996), as taxas de penetração instantâneas são mais elevadas para furação carotada do que para furação destrutiva, no entanto esta é mais económica para furos de maior profundidade (cerca de 50 a 100%) pois não existem perdas de tempo a extrair amostras.

Este método é tipicamente utilizado para a execução de furos até 75 mm de diâmetro e profundidades de 50 a 150 m. Algumas das vantagens deste método são:

- O mesmo equipamento pode ser utilizado para a execução de furos de investigação e de injeção;
- É possível uma exploração contínua ou intermitente do maciço rochoso ao longo da totalidade do furo;
- A perfuração pode ser realizada até profundidades relativamente elevadas (300m);
- Realizam-se furos com menores desvios do que o método de rotopercussão;
- O entupimento das fissuras do maciço rochoso é raro, ou não existe;
- É possível furar em qualquer tipo de rocha;
- Permite o uso do maior número de alternativas para conferir energia ao equipamento (ar, eletricidade, diesel);
- As brocas de furação à rotação produzem paredes de furo lisas, o que facilita a instalação posterior de obturadores para efetuar a injeção;
- É possível atingir boas velocidades de furação em formações pouco duras (1 a 10 m/h, segundo Kutzner, 1996);
- Não são aplicadas quaisquer vibrações à formação rochosa ou a estruturas adjacentes.

Embora este método apresente vantagens significativas, o seu uso tem vindo a diminuir em obras geotécnicas, sendo substituído por métodos destrutivos de rotopercussão, principalmente por razões económicas.

2.6.1.2. Rotopercussão

Nesta técnica, a broca roda e ao mesmo tempo é percutida, sendo a velocidade de avanço geralmente controlada pela energia de percussão. Com um martelo de topo (THH), as varas sofrem rotação e são percutidas, podendo atingir 80-160 rpm e furar um diâmetro até cerca de 102 mm. Num martelo de fundo de furo (DHH) com circulação direta, as varas apenas sofrem rotação no rotor, e o ar comprimido que circula pelo interior das varas, ativa a percussão no martelo. Estes martelos têm uma velocidade de 10-60 rpm e furam diâmetros superiores a 90 mm e profundidades superiores à centena de metros. A sua taxa de avanço costuma ser constante com a profundidade, desde que os outros fatores se mantenham inalterados (10 a 20 m/h segundo Kutzner, 1996).

As vantagens que esta técnica apresenta relativamente à rotação são as seguintes:

- Velocidades de furação superiores (por um fator de 5 ou mais – Deere, 1982) quando comparadas com as obtidas por técnicas de rotação;
- As máquinas usadas na furação são relativamente pequenas, leves e móveis;
- Baixos custos de furação.

Saliente-se, contudo, que os martelos de topo, apresentam como principal limitação, a emissão de um número muito significativo de poeiras, o que inviabilizará a utilização em galerias.

3. ASPETOS GERAIS EXECUTIVOS E DE CONTROLO DE QUALIDADE

Neste capítulo serão abordados, de uma maneira geral, os aspetos executivos relacionados com o dimensionamento de uma cortina de impermeabilização, desde a definição das suas dimensões até aos procedimentos de injeção adotados e os equipamentos a estes associados, bem como a temática de controlo de qualidade da empreitada. Embora todo o processo de dimensionamento tenha início na fase de projeto, este só se dá por terminado na fase construtiva, permitindo assim a sua constante adaptação às condições reais do maciço que vão sendo encontradas. Inclui ainda uma referência aos ensaios de injectabilidade, pese embora estes devam ser efetuados, em teoria, durante o esboçar do projeto.

Os métodos mais específicos de dimensionamento serão abordados apenas no Capítulo 4, como parte integrante de metodologias pré-definidas.

3.1. ALGUNS ASPETOS A CONTEMPLAR NO DIMENSIONAMENTO

Como já foi mencionado anteriormente, existe, cada vez mais, um cuidado crescente com a definição das medidas de controlo da percolação, nomeadamente das cortinas de impermeabilização de barragens. Simultaneamente, o custo da água armazenada tem vindo a tornar-se uma consideração cada vez mais importante no que toca ao projeto de medidas que minimizam as probabilidades da sua perda.

Portanto, é cada vez mais importante, que o processo de dimensionamento da cortina e de todo o programa de injeções leve em consideração as características geológicas e hidrológicas do maciço e que a melhor tecnologia disponível seja utilizada.

De seguida serão apresentadas os parâmetros mais importantes a contemplar no dimensionamento correto de uma cortina de impermeabilização.

3.1.1. Profundidade da cortina

A profundidade que a cortina deve atingir, de acordo com a prática americana, é tradicionalmente determinada com base em geometria e numa fórmula baseada na carga hidráulica projetada, produzindo, geralmente, uma cortina menos profunda do que a realizada de acordo com a prática

européia, cuja profundidade é definida como sendo, aproximadamente, igual à altura da barragem (Ewert, 2003), podendo no máximo estender-se até uma profundidade 1,5 vezes àquela.

O principal objetivo da fórmula utilizada pela escola americana é o de aumentar o caminho de percolação da água para algum valor consistente com o comprimento da fundação da barragem ou do núcleo impermeável. Embora esta abordagem possa proteger a barragem em si dos efeitos da percolação, a quantidade de água que ainda circula não será necessariamente reduzida. Portanto, se a água tiver um valor elevado, ou se for provável a ocorrência de fenômenos de erosão interna a profundidades superiores às previstas por uma abordagem matemática ou geométrica, devem ser tomadas medidas de modo a aprofundar a cortina, até esta atingir um estrato ou zona “impermeável”, ou seja, considerada como impermeável para os objetivos em prossecução.

Em vales íngremes, onde se pretenda implantar uma barragem, os fenômenos de libertação de tensões que se irão verificar nos encontros a partir do interior do maciço, podem fazer com que seja necessário o aprofundamento da cortina nestas zonas, sendo então apropriada a construção desta a uma profundidade uniforme.

Resumindo e segundo Ewert (2003), devem ser as condições geológicas e não considerações geométricas, em qualquer caso, o principal fator na determinação da profundidade a atingir pelo tratamento, mesmo que leve à construção de uma cortina assimétrica.

O desvio que os furos sofrem com o aumento da profundidade de furação pode tornar-se uma restrição à definição da profundidade máxima a atingir pela cortina sem se criarem zonas não tratadas entre furos. O desvio depende das condições geológicas existentes, do equipamento de furação utilizado e do cuidado com que a furação é realizada. Ewert (*op. cit.*) sugeriu que a profundidade máxima a atingir por uma cortina seria da ordem de 50 m em maciços de fraca qualidade e de 150 m em presença de condições desfavoráveis.

A extensão da cortina até uma camada “impermeável”, ao invés de uma profundidade determinada matematicamente, é particularmente importante em maciços calcários, onde a percolação de água através de canais de dissolução pode impedir o reservatório de encher ou causar danos na região a jusante.

3.1.2. Extensão da cortina

De modo a prevenir que a água consiga circular à volta da cortina através de maciço não tratado, e portanto mais permeável, a cortina deve ser alargada para o interior do maciço. Ewert (2003) sugere

que ela seja estendida até ao ponto em que a altura de água do reservatório intercete o nível freático natural. Refere ainda que maciços permeáveis criam uma inclinação no nível freático, estendendo-o potencialmente para o interior dos encontros, requerendo uma ampliação da cortina (*op. cit.*).

Se as inclinações dos encontros acima do coroamento da barragem forem relativamente suaves, basta continuar a cortina ao longo destes. No caso de encontros íngremes, é habitual recorrer ao uso de furos em leque de modo a finalizar a cortina.

Os furos em leque são geralmente realizados muito próximos uns dos outros, mas com inclinações sucessivamente menores o que, assumindo que não existe nenhum desvio, coloca o seu nível mais profundo à distância máxima permitida entre furos normais quando estes atingem a distância pretendida para além do final da cortina.

No entanto, é necessário ter em conta que sempre existirão desvios nos eixos dos furos e que eles tenderão a ser maiores, quanto mais inclinados for o seu eixo. Portanto, o espaçamento real entre furos na base da cortina pode ser muito diferente do que o indicado pelo dimensionamento.

3.1.3. Espaçamento e orientação de furos

O espaçamento dos furos primários numa cortina é geralmente baseado na ideia que a calda injetada em qualquer um deles tem poucas probabilidades de atingir o furo mais próximo, em qualquer direção, oscilando o espaçamento mais comum entre 6 e 12 m.

Um dos problemas que é muitas vezes esquecido é que, com os furos espaçados à sua distância máxima é possível, e provável, que estes não intersetem descontinuidades muito espaçadas ou outros acidentes geológicos isolados que tenham a capacidade de fazer passar grandes volumes de água pela cortina. Como resultado deste hiato, os prazos e estimativas de custos irão ser baseados numa cortina construída utilizando um espaçamento máximo de furos. No caso das condições geológicas presentes obrigarem ao uso de um maior número de furos do que as estimativas previam, irá haver um aumento de custos e atrasos nos prazos previstos, e tanto o Adjudicatário como o Dono da Obra irão culpar o Projetista.

De modo a evitar estes problemas, a estimativa das quantidades de trabalho necessárias deverão sempre incluir uma contingência para furos adicionais. Um valor na ordem de 50% provavelmente não será excessivo na maioria dos casos, pois uma redução geral de 50% no espaçamento dos furos inicialmente contemplados irá duplicar a quantidade de furação necessária para os realizar (Weaver e Bruce, 2007).

Em termos da orientação, é prática comum a execução de todos os furos perpendiculares em relação à inclinação média da superfície do terreno, com o objetivo de se obter uma cortina com uma profundidade igual à dos furos, ou de se furar verticalmente até uma profundidade constante (figura 3.1).

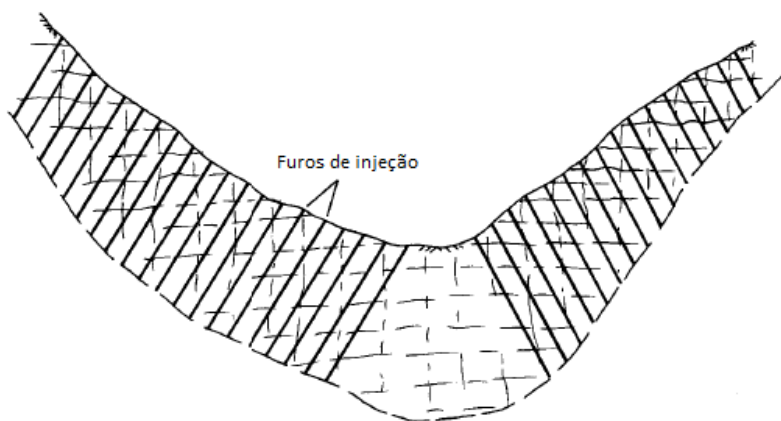
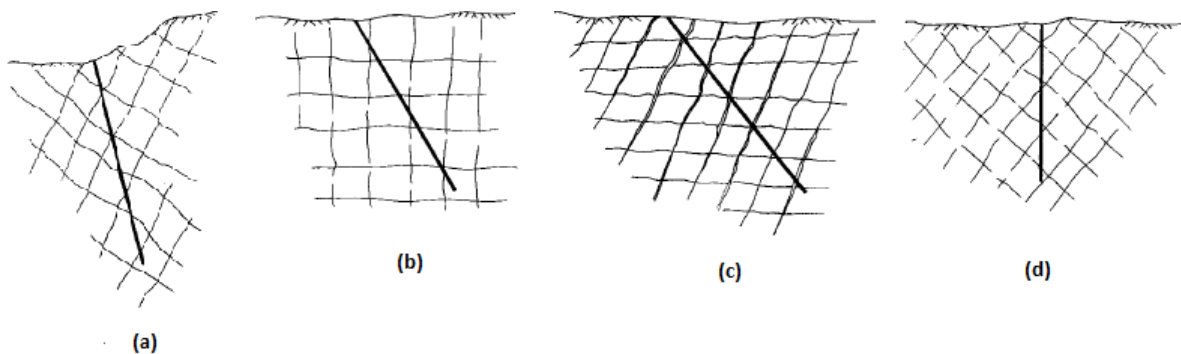


Figura 3.1 - Fase inicial de dimensionamento de uma cortina de impermeabilização (adaptado de Houlsby, 1990)

No entanto, a não ser que exista uma distribuição uniforme de todas as descontinuidades possíveis de serem tratadas, existe a possibilidade de que descontinuidades com uma inclinação idêntica à dos furos não sejam intersectadas por estes e, portanto, não sejam tratadas. Idealmente, os furos devem ser realizados com orientações que lhes permitam intersectar o maior número possível de descontinuidades, figura 3.2.



Famílias de descontinuidades: (a) com inclinações irregulares, (b) verticais e horizontais, (c) a sub-vertical é mais importante do que as restantes, (d) que permitem a execução de furos verticais

Figura 3.2 - Atitudes possíveis para furos em função de diversas atitudes das famílias de descontinuidades (adaptado de Houlsby, 1990)

O Comité Suíço de Grandes Barragens (1985, *in* Weaver e Bruce, 2007) indicou que os furos deveriam intersectar os planos dos principais sistemas de descontinuidades com ângulos superiores a 30° (figura 3.3) de modo a intercetarem o maior número possível de descontinuidades por metro, devendo as cortinas ser constituídas por, pelo menos, duas fiadas de furos com orientações diferentes.

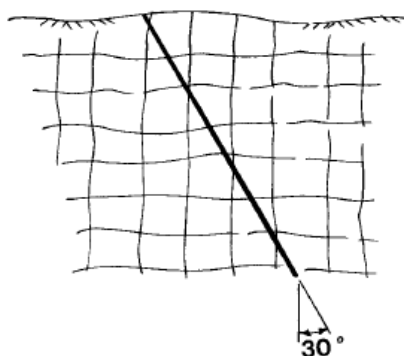


Figura 3.3 - Inclinação mais eficaz dos furos de injeção na presença de famílias de descontinuidades subverticais e subperpendiculares entre si (adaptado de Houlsby, 1990)

Esta abordagem, ou adaptações dela, ainda hoje são utilizadas com sucesso num grande número de obras, e apoiadas por um grande número de especialistas (Weaver e Bruce, 2007).

3.1.4. Pressões de injeção

Segundo Weaver (2000), as diferentes regras gerais usadas pelos especialistas europeus e americanos de injeções para determinar as pressões a utilizar têm sido alvo de muita controvérsia ao longo dos anos, entre ambos os grupos. Na figura 3.4.encontram-se representadas, graficamente, ambas as regras.

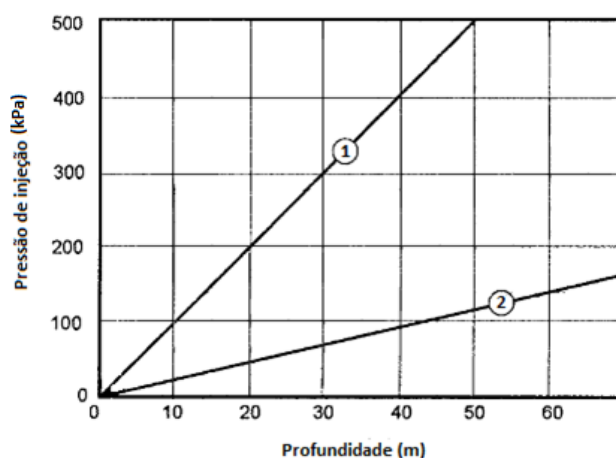


Figura 3.4 – Representação gráfica da (1) “regra europeia” e (2) “regra americana” (adaptado de Warner, 2004)

Através da análise desta é possível assumir que as pressões ditadas pela “regra europeia” seriam claramente prejudiciais para rochas pouco resistentes, devido à aplicação de pressões elevadas a profundidades reduzidas. No entanto, estas têm sido usadas com sucesso em maciços de fundações rochosos de características razoáveis, sendo que pressões ainda mais elevadas do que as permitidas por esta regra também já foram aplicadas com sucesso (*op. cit.*).

No caso da “regra americana” e embora ela se fundamente geralmente na proteção contra potenciais fenómenos de levantamento hidráulico de estratos horizontais, a aplicação das pressões que esta regra dita podem não ser suficientes para garantir a penetração adequada das caldas em fissuras de pequena abertura. Ao mesmo tempo, essas pressões podem ser excessivas para injeções em rochas pouco resistentes (*op. cit.*)

Portanto, aparenta ser evidente que, ao invés de adotar cegamente qualquer uma das regras, a escolha das pressões de injeção deve ser efetuada com base em fatores específicos a cada obra incluindo, dentro do possível, as condições em cada furo específico a injetar.

Este aspeto será abordado no âmbito das metodologias de dimensionamento apresentadas mais adiante (ver capítulo 4.).

3.2. ENSAIOS DE INJECTABILIDADE

Especialmente quando a informação existente sobre a área a tratar é muito reduzida ou inexistente, devem realizar-se ensaios de injectabilidade *in situ*, antes da finalização do dimensionamento das injeções e da cortina. Entre os parâmetros mais importantes de determinar, que só podem ser obtidos através destes ensaios, encontra-se a condutividade hidráulica residual média do maciço rochoso que pode ser obtida após o tratamento (Weaver e Bruce, 2007).

A informação recolhida neste banco de ensaios, para além de ajudar a refinar o dimensionamento da cortina e as metodologias mais adequadas para a sua construção, servirá também como uma base para definir o equipamento e quantidade de trabalho necessária para terminar o tratamento de impermeabilização dentro do prazo estipulado.

A abordagem convencional para um programa de ensaios de injectabilidade consiste na construção de um segmento linear de uma cortina de impermeabilização, usando o método *split-spacing*. Da construção desta cortina de ensaio, existem alguns dados estatísticos que devem ser retirados, tais como:

- a) O coeficiente de redução de condutividade hidráulica, ou o rácio entre permeabilidade média pré e pós injeção em cada trecho;
- b) A quantidade média de calda injetada para cada trecho na sequência de injeção;
- c) O espaçamento máximo entre os centros da última ordem de furos.

Embora os dados obtidos indiquem a eficácia do programa de ensaios de injectabilidade, a análise estatística deve focar-se na distribuição e variação dos dados e na averiguação do provável tipo de condições subsuperficiais responsáveis por essa mesma distribuição e variação.

Devido à incerteza envolvida neste processo, deve ter-se presente a noção que é possível a obtenção de conclusões mais fiáveis através da execução de furos de observação uma vez concluídas as injeções de ensaio.

A fiabilidade dos resultados obtidos depende, em parte, da complexidade da geologia local. Segundo Nonveiller (1970) “quando na presença de condições geológicas mais complexas, poderá ser mais apropriado realizar vários ensaios de injectabilidade em locais com condições geológicas típicas, de modo obterem-se dados mais fiáveis para a realização do dimensionamento da cortina em todos os diferentes tipos de litologias de uma determinada obra.”

3.3. PREVISÃO DO CONSUMO DE CALDA

Com base em razões contratuais e de estimativa de custos, é necessário estimar a quantidade de calda que será absorvida pela fundação durante o todo o processo de tratamento. No entanto, é difícil efetuar essa estimativa com um elevado grau de exatidão, pois a penetração da calda encontra-se dependente de vários fatores, já abordados anteriormente, como a abertura das descontinuidades, a sua rugosidade e continuidade, entre outras.

No seu relatório geral do ICOLD, Bozovic (1985) concluiu que a correlação entre o consumo de calda num determinado furo e os valores de absorção em Lu obtidos nesse mesmo furo era muito fraca. Bozovic (*op. cit.*) sugere ainda que, tendo em consideração as diferentes propriedades reológicas das caldas e da água, é fisicamente impossível existir qualquer correlação.

Estas conclusões são apoiadas por Ewert (1985) e Sims e Rainey (1985) ao apresentarem as correlações obtidas para as barragens de Aaback, Alemanha (figura 3.5) e Gitaru, Quênia, respetivamente.

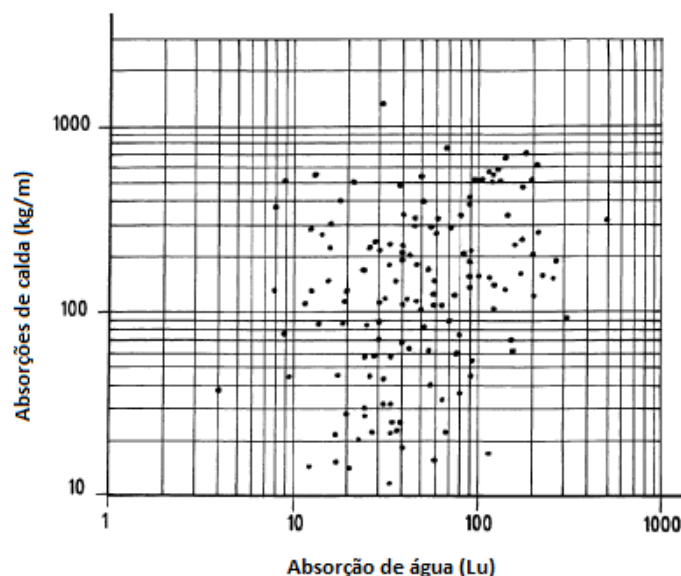


Figura 3.5 - Correlação entre absorção de água e calda (adaptado de Jawantzky in Ewert, 1985)

Mais recentemente, Fell *et al.* (2005) abordaram esta problemática, concordando com as conclusões obtidas anteriormente por aqueles autores, na medida em que, caso a absorção de calda e os valores de absorção em Lu sejam comparados diretamente, a correlação obtida é muito fraca ou inexistente. No entanto, aqueles autores (*op. cit.*, 2005) consideram que, se o espaçamento entre descontinuidades for usado para estimar a abertura destas e a capacidade de penetração da calda for estimada através da análise da dimensão das partículas constituintes desta, da pressão de injeção, viscosidade e tempo de presa, deverá ser possível obter uma melhor previsão do consumo de calda.

Caso esta abordagem seja aplicada em conjunto com a execução de furos de ensaio, é de esperar que a estimativa obtida seja razoavelmente exata (*ib.*).

Assim, para se obter a melhor estimativa possível, devem ser recolhidos dados de obras com condições geológicas idênticas e realizar estimativas iniciais da absorção de calda por cada metro de furo baseadas nos dados recolhidos (*ib.*).

No entanto, para que as estimativas realizadas tenham qualquer valor, os furos de ensaio devem ser realizados numa área representativa da fundação da barragem, com uma monitorização rigorosa dos valores de absorção para furos primários, secundários, e assim por diante.

3.4. PROCEDIMENTO DE INJEÇÃO

Uma vez realizados e limpos os furos e a composição da calda determinada, é possível dar início à injeção. Em termos práticos, estas operações são realizadas simultaneamente; no entanto a

sequência em que são realizadas devem ser planeadas em detalhe. Regra geral, não deve haver quaisquer dois furos com operações de furação ou injeção a ocorrer em simultâneo, devido ao risco de interconexão.

Na preparação dos furos não se deve ter apenas em conta o faseamento definido, mas também a própria injeção, que será geralmente realizada por trechos, ou seja, apenas uma zona do furo será injetada de cada vez. A injeção dos trechos pode ter início desde a superfície (descendente) ou a partir do fundo do furo (ascendente), podendo existir algumas variações dentro de cada método. Quando na presença de rocha pouco sã ou muito diaclasada, é possível recorrer ao uso de circuitos de injeção. Este e outros métodos de injeção serão caracterizados em seguida, bem como os comprimentos dos trechos mais apropriados a adotar.

3.4.1. Definição do comprimento dos trechos

O comprimento de trechos individuais pode variar bastante, dependendo de diversos fatores, sendo que a determinação do comprimento ideal é crucial para a execução de um tratamento eficaz. Trechos de dimensões mais reduzidas (< 3 m) irão sempre proporcionar uma melhor qualidade do tratamento, enquanto que trechos de maiores dimensões (> 5 m) serão mais económicos. Regra geral, o comprimento dos trechos aumentará conforme o aumento da profundidade de injeção e/ou a melhoria da qualidade do maciço.

Segundo Warner (2004), comprimentos na ordem de 1,5-3 m são apropriados para trechos próximos da superfície enquanto que, a profundidades mais elevadas, podem chegar aos 3-6 m. Quando na presença de áreas do maciço muito diaclasadas ou em zonas críticas, como é o caso do contacto da base da barragem com o maciço, devem ser utilizados comprimentos da ordem de 0,6m.

É necessário ter em conta que à medida que aumenta o comprimento dos trechos, maior será a probabilidade de existir uma variação maior nas aberturas de descontinuidades, sendo que a calda injetada tenderá a preencher as descontinuidades de maiores dimensões, selando apenas as de menor abertura (figura 3.6).

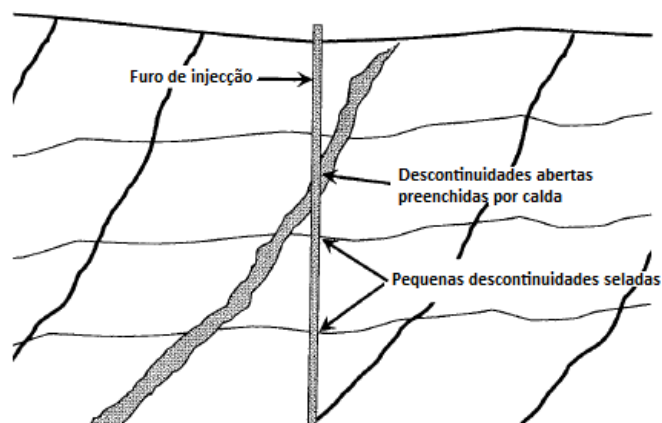


Figura 3.6 - Pormenor de como são tratadas diferentes tipos de descontinuidades (adaptado de Warner, 2004)

Nestes casos, a eficácia da injeção será comprometida, podendo não ser atingida a redução de permeabilidade pretendida após a execução dos furos planejados. Torna-se assim necessária a execução de furos adicionais, especialmente se o nível de impermeabilização que se pretendia atingir fosse muito elevado, o que levaria a um aumento da despesa. O que ao início aparentava ser uma poupança (adoção de trechos de maior comprimento) poderia muito facilmente transformar-se em significativos aumentos de custos.

A seleção do comprimento de trecho ideal é um dos aspetos das injeções de permeação que depende bastante da experiência dos operadores, sendo que os comprimentos irão variar, não só entre furos, mas também ao longo de cada furo. Geralmente os comprimentos são pré-determinados dependendo:

- Das condições geológicas e da profundidade a partir da qual alterações do grau de permeabilidade são expectáveis de ocorrer;
- Do comprimento de trecho mínimo, porque trechos mais pequenos são mais caros de furar devido aos custos de montagem do equipamento;
- Pressões de injeção admissíveis nas zonas menos profundas dos furos, dependentes das condições geológicas.

Resumindo, trechos mais curtos devem ser usados quando o maciço é de fraca qualidade, particularmente em zonas importantes para a obra, e nas zonas menos profundas dos furos, bem como em furos onde exista grande variação das aberturas das descontinuidades naturais. Trechos mais compridos são aplicáveis em zonas profundas dos furos, em furos onde a abertura das descontinuidades seja mais homogênea e em rocha de melhor qualidade.

3.4.2. Definição do espaçamento entre furos

Dependendo das dimensões e da importância da barragem, existem vários métodos de definição do espaçamento entre furos da cortina. São eles:

- **Método livre**, onde os furos são posicionados sem qualquer ordem específica, geralmente em zonas do maciço que apresentem valores de condutividade hidráulica acima dos pretendidos. Este método é geralmente utilizado para barragens pequenas (< 15 m);
- **Método de espaçamento fixo**, onde tal como o nome indica, os furos são espaçados a uma distância pré-definida, geralmente entre 1 a 5 m, sem qualquer outra organização. Este método é utilizado em barragens onde a perda de água não tem uma importância elevada e portanto os limites de permeabilidade impostos são mais flexíveis;

Estes dois métodos, embora ainda utilizados atualmente, não permitem a obtenção de cortinas de impermeabilização eficazes, essenciais em obras de grande importância e onde perdas de água elevadas não são toleradas. Para o tratamento desses casos existe o **método de *split-spacing***, caracterizado em seguida.

3.4.2.1. *Split-spacing*

O conceito de *split-spacing* foi proposto por Nonveiller (1970), e segundo este, o espaçamento inicial entre os furos constituintes da cortina deve ser escolhido de modo a que as áreas espectáveis de penetração da calda não se sobreponham inicialmente. Geralmente esse espaçamento é da ordem dos 12 m, podendo ser reduzido até 6 m em casos onde a permeabilidade seja baixa o suficiente que garanta a impossibilidade de contacto entre os furos.

Esses furos, denominados de primários, são então executados, realizados ensaios de permeabilidade e ulteriormente injetados até uma profundidade ou permeabilidade pré-definida (geralmente na ordem de 1 a 10 Lu).

O espaçamento entre furos é então reduzido para metade e o processo reiniciado quantas vezes forem necessárias até ser atingida a permeabilidade pretendida ao longo de toda a cortina. Os furos realizados em cada uma destas etapas são denominados de secundários, terciários, quaternários, e assim sucessivamente, como é possível observar na figura 3.7.

Geralmente, os furos de ordem superior (terciários, quaternários, etc) não são realizados até à profundidade máxima da cortina, mas sim até profundidades que permitam tratar zonas de pior qualidade encontradas em furos de ordem inferior (Weaver e Bruce, 2007).

Um princípio importante a ter em conta durante a execução deste método é que a furação deve começar com um furo primário e acabar com outro. Isto significa que nenhum furo secundário ou de ordem superior deve ser iniciado até que todos os furos primários de uma determinada fiada ou zona tenham sido furados, injetados, e a calda comece a ganhar presa., sendo este princípio aplicável para furos de qualquer ordem.

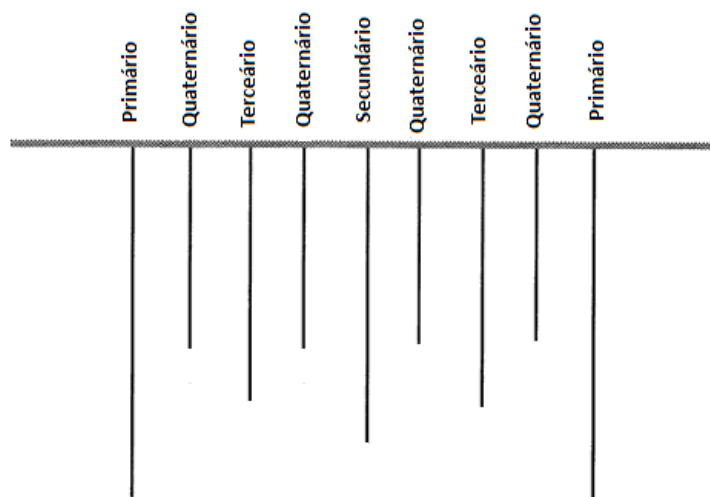


Figura 3.7 - Representação esquemática de uma sequência de furos realizada segundo o método split-spacing

O faseamento da execução destes furos tem como objetivo permitir a avaliação da redução da permeabilidade conforme o espaçamento entre furos é diminuído, bem como possibilitar a identificação de possíveis contactos entre furos e sua correcção.

No caso de cortinas onde é necessário a execução de furos de elevada ordem (quaternário, etc), a disposição, em corte e em profundidade mais apropriada dos furos encontra-se identificada na figura 3.8 (Houlsby, 1990). Esta disposição combina geralmente economia com a eficácia do tratamento, pois evita realizar injeções desnecessárias ao mesmo tempo que permite injeções adicionais em zonas de fraca qualidade.

A aplicação desta disposição em conjunto com a inclusão de cláusulas adequadas nas especificações de projecto permitirá obter uma boa margem de manobra, sendo possível tratar adequada e atempadamente zonas do maciço mais fissuradas ou acidentadas geológicas previamente desconhecidas. Na figura 3.9 é possível observar algumas das variações possíveis de realizar a esta disposição.

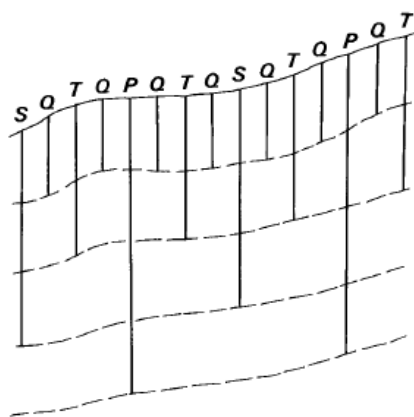
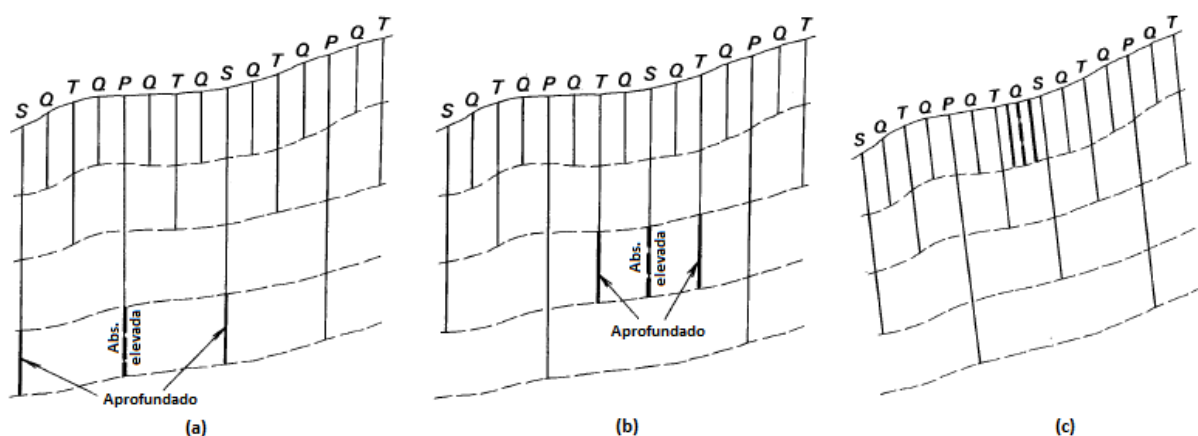


Figura 3.8 - Faseamento de uma cortina de impermeabilização profunda (adaptado de Houlsby, 1990)



(a) trechos de furos primários, (b) secundários com absorções de calda elevada, (c) zonas superficiais do maciço muito alteradas

Figura 3.9 - Alterações mais comuns ao faseamento inicial de injeção (adaptado de Houlsby, 1990)

Este tipo de disposição é aplicado particularmente em fundações cuja permeabilidade decresce com a profundidade e cujo último trecho da cortina se encontra em zonas do maciço com uma permeabilidade natural não muito longe da definida em projeto.

3.4.3. Sequência de injeção

O sequenciamento das injeções deve ser sempre realizado com sentido crítico. Quando o maciço é são e o risco de interligação entre discontinuidades reduzido, é aceitável a execução da furação do trecho superior de um determinado furo, enquanto é realizada uma injeção nos trechos inferiores de um furo adjacente.

Regra geral, o espaçamento entre furos pode ser mais reduzido em rocha sã, mas o mesmo deve ser aumentado, conforme a qualidade do maciço diminui. Independentemente do espaçamento escolhido, uma ordem de injeção projetada (ver seção 2.4.1.) deve ser sempre respeitada. Dentro do mesmo furo, descrevem-se seguidamente as opções existentes.

3.4.3.1. Descendente sem obturador

Este é uma das técnicas mais utilizadas quando se pretende atingir um nível elevado de impermeabilização do maciço, pois cada trecho é furado e injetado antes da execução do trecho inferior seguinte, permitindo assim uma avaliação contínua do grau de impermeabilização atingido. Deste modo, é mais fácil identificar quando se atingiram os valores projetados.

Esta técnica permite também a utilização de pressões de injeção mais elevadas nos trechos mais profundos, pois reduz a probabilidade de ocorrência de fuga da calda para os trechos superiores, visto estes já se encontrarem tratados. É possível dizer que as pressões de injeção são limitadas apenas pela eficácia de tratamento do trecho superior ao que se encontra a ser executado.

Neste método é necessária uma nova montagem do equipamento de furação e injeção a cada trecho, o que torna o método dispendioso, sendo no entanto um dos preferidos por Houlsby (1977). A figura 3.10 apresenta uma representação esquemática da técnica acima mencionada.

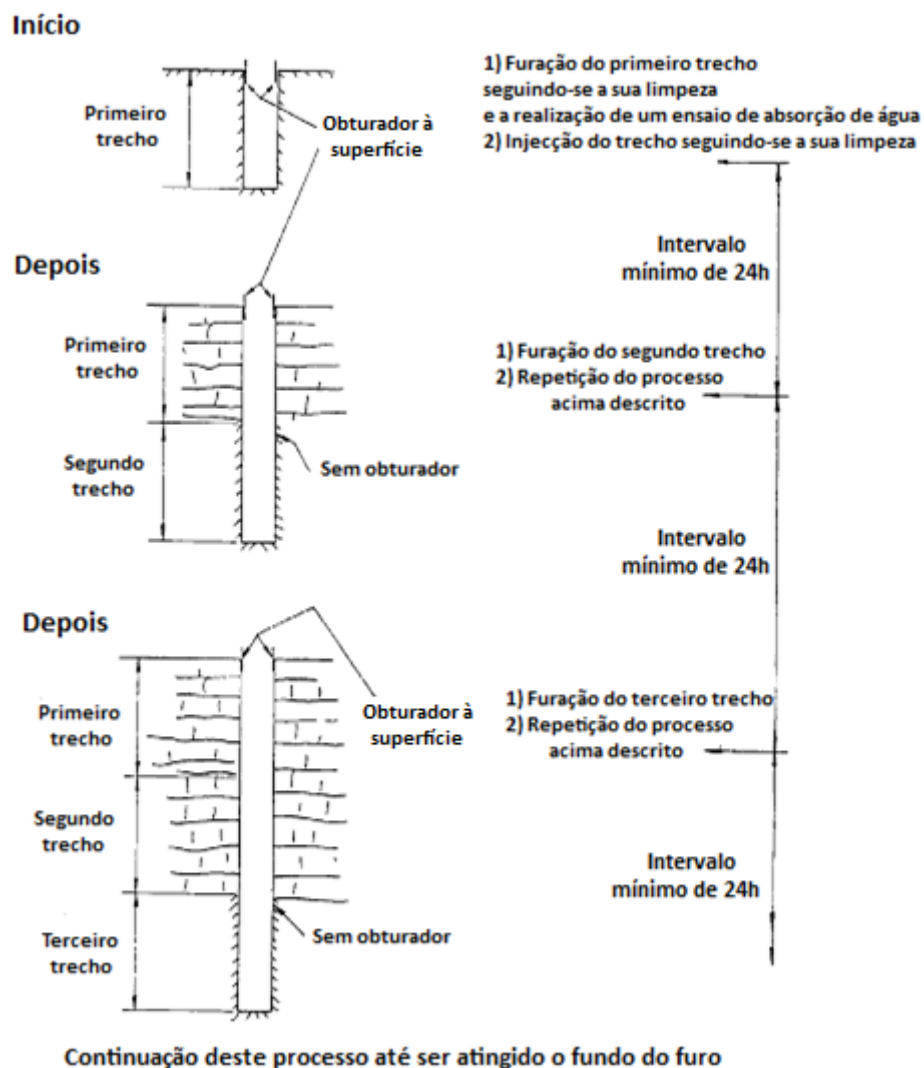


Figura 3.10 - Técnica para a execução de um furo descendente sem obturador (adaptado de Houlsby, 1990)

3.4.3.2. Descendente com obturador

Esta técnica permite o uso de pressões de injeção crescentes nos trechos inferiores, porque essas pressões não são aplicadas desde a superfície. No entanto, podem existir problemas com o assentamento do obturador nas paredes do furo e com fugas de calda através dessa zona.

A exsudação do furo, isto é, a remoção da água límpida que se acumula no topo da camada de calda enquanto esta ganha presa, não pode ser efetuada exceto à superfície do terreno ou seja, não é sempre possível imediatamente acima de cada trecho injetado.

Ewert (1985) demonstra uma preferência por este método, devido à probabilidade de ocorrência de fracturação hidráulica nos trechos superiores dos furos se forem utilizados métodos de injeção descendentes que não recorram ao uso de obturadores. Uma representação esquemática da técnica acima descrita consta da figura 3.11.

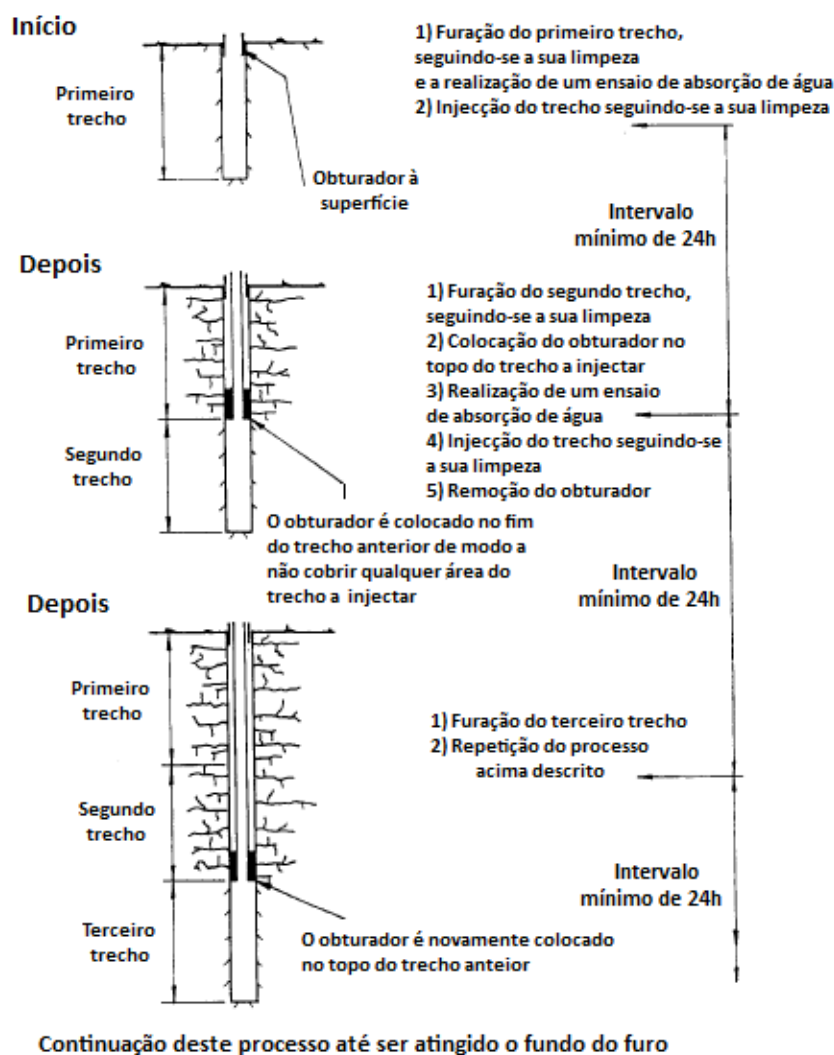


Figura 3.11 - Técnica para a execução de um furo descendente com obturador (adaptado de Houlsby, 1990)

3.4.3.3. *Ascendente com obturador*

Ao contrário das anteriores, esta técnica não permite a determinação progressiva da profundidade necessária de furação de modo a atingir o nível de impermeabilização pretendido, devido ao facto dos furos serem inicialmente realizados até uma profundidade pré-definida.

Comparando com as técnicas descendentes esta é mais económica, em teoria, pois os equipamentos de furação e injeção apenas necessitam de ser montados uma vez. No entanto, essa poupança pode ser contrabalançada pela necessidade de adoção de profundidades de furação mais conservativas, uma vez que o furo é executado de uma só vez.

Outras desvantagens desta técnica são a possibilidade de colapso do furo ser maior, consequentemente o aumento do seu diâmetro durante a furação, bem como as dificuldades de colocação dos obturadores durante a injeção em maciços de fraca qualidade.

Tal como a técnica anterior, também apresenta problemas em relação à decantação do furo, sendo mais apropriado para furos secundários ou terciários, onde a profundidade máxima de furação é conhecida, e em maciços que não sejam suscetíveis a colapso, figura 3.12.

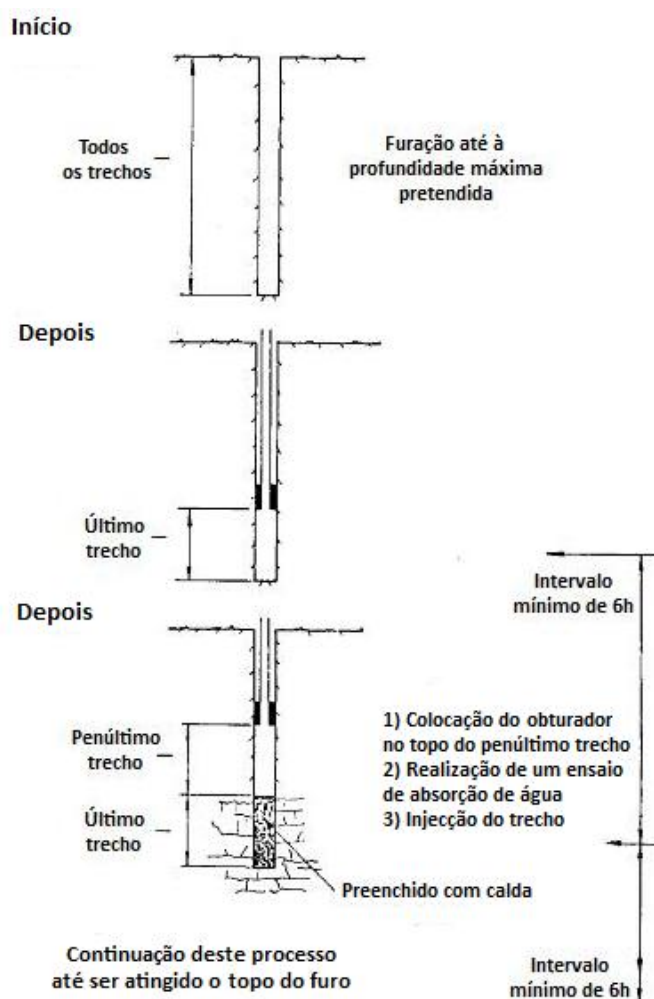


Figura 3.12 - Técnica para a execução de um furo ascendente com obturador (adaptado de Houlsby, 1990)

3.4.3.4. Circuito de injeção

O método de circuito de injeção é utilizado para tratar maciços onde o colapso de furos é um acontecimento prevalente. Deste modo, é necessário utilizar um tubo inserido em toda a profundidade que se pretende injetar; este tubo forma parte do sistema de circulação da calda.

Este método é difícil de executar, propenso a ocorrência de obstruções no furo e relativamente dispendioso. As obstruções têm origem quando materiais provenientes do colapso de parte da parede do furo bloqueiam a entrada do tubo no fundo do furo, interrompendo a circulação da calda.

De modo a corrigir estes problemas, os sistemas de bombagem instalados têm que ser organizados de maneira a permitir inversões imediatas do fluxo da calda.

É pouco provável que a qualidade do tratamento obtida seja elevada pois, entre outros problemas, qualquer quantidade de água que entre no furo será imediatamente levada pelo circuito de volta ao agitador e irá diluir a calda. Segundo Warner (2004), muitos dos operadores que recorrem a esta

técnica recusam utilizá-la novamente. No entanto, esta é uma das poucas técnicas capazes de tratar maciços francamente colapsáveis e de impermeabilizar o maciço suficientemente para que outros métodos mais convencionais possam ser utilizados. Uma representação esquemática da técnica descrita consta da figura 3.13.

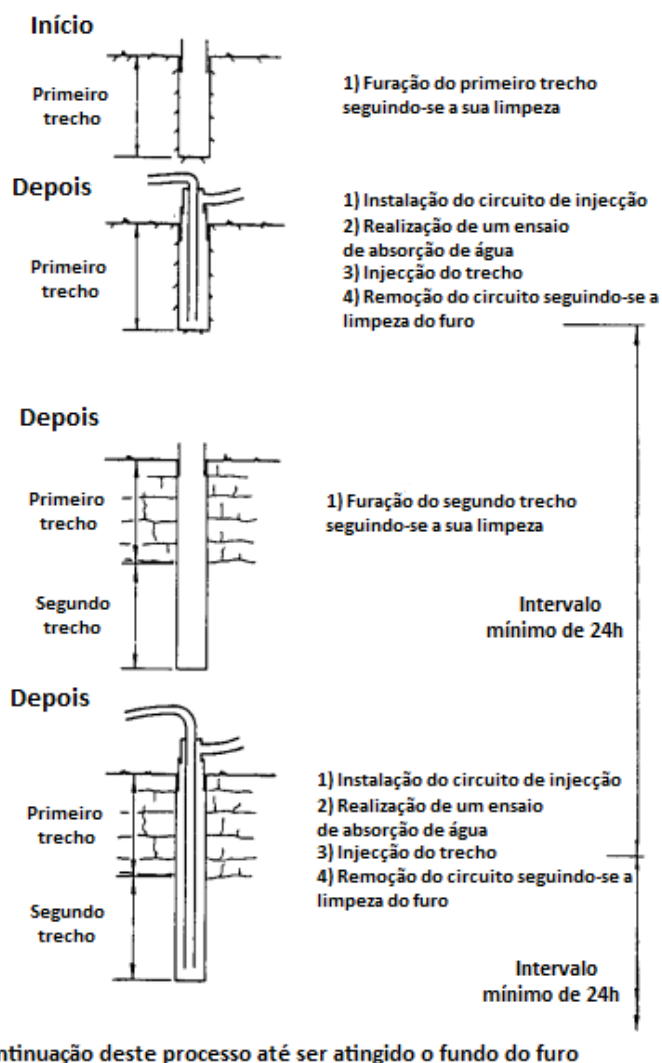


Figura 3.13 – Técnica para a execução de um furo descendente com circuito de injeção (adaptado de Houlsby, 1990)

3.4.4. Equipamentos acessórios

3.4.4.1. *Tubo guia*

De modo a providenciar uma conexão estável para a coluna de injeção, ou uma boa superfície para assentar um obturador, algum tipo de tubo deve ser inserido, à superfície do maciço, em cada furo. Na maioria dos casos, esse dispositivo é um pequeno tubo de aço, de dimensões ligeiramente maiores do que a cabeça de furação que irá realizar o furo. Este tubo é geralmente cimentado ao

trecho superior do furo, numa zona alargada de propósito para o efeito, como é possível observar na figura 3.14.

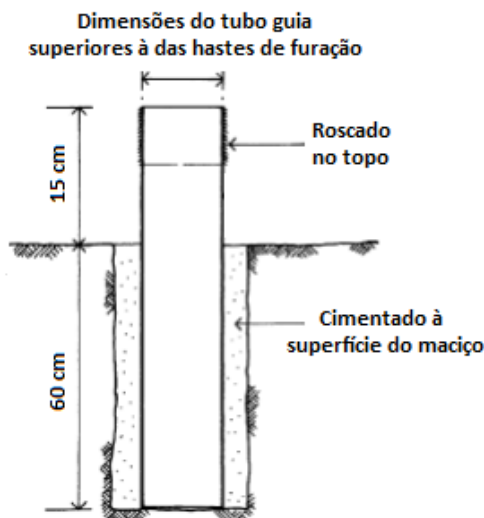


Figura 3.14 - Esquema da utilização do tubo guia (adaptado de Fell *et al.*, 2005)

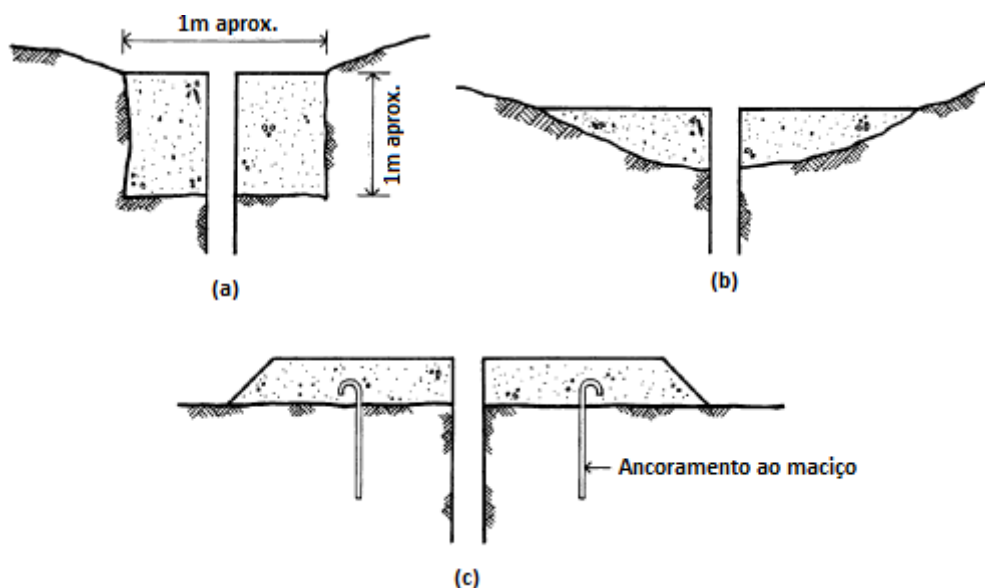
Os tubos guia devem ser utilizados mesmo quando as injeções subsequentes forem efetuadas segundo o método descendente com o uso de obturadores, isto porque estes têm ainda por função impedir que águas residuais ou outros materiais detriticos entrem no furo, contaminando-os.

3.4.4.2. Lajes e maciços de injeção

Em situações onde a zona superficial do maciço se encontra fortemente alterada ou diaclasada, a construção de um laje de injeção pode ser vantajosa, pois permite a criação de uma zona mais impermeável do que seria possível obter com a utilização de tubos guia.

Na sua forma mais simples, esse maciço consiste numa simples vala preenchida com cimento. No entanto, é importante que as paredes da vala sejam rugosas e que a largura da sua base nunca seja inferior à do topo, de modo a oferecer uma boa resistência às forças de levantamento hidráulico que irão ocorrer durante a injeção do furo.

Em termos das suas dimensões, estas variam entre 0,6 a 1,2 m de profundidade e pelo menos 1 m de diâmetro (Warner, 2004). Na figura 3.15 é possível observar algumas das formas que aquelas lajes podem adquirir. De salientar que nos caso (b) e (c), as suas formas mais alongadas/menos profundas irão oferecer menos resistência às forças de levantamento hidráulico e serão suscetíveis a sofrer deslocamentos. Daí ser necessário ancorar os maciços com cabos de aço até 2 m de profundidade como é possível observar no caso (c).



Maciços: (a) forma ideal, (b) forma incorreta e (c) em extensão, sobre a zona a tratar

Figura 3.15 - Exemplos de maciços de contenção (adaptado de Fell et al, 2005)

Em casos onde o maciço apresente descontinuidades com um espaçamento reduzido, é possível aplicar uma laje à superfície antes do início da injeção. Esta camada torna possível o uso de pressões de injeção ligeiramente mais elevadas em alguns maciços rochosos, previne fugas excessivas de calda para a superfície e facilita de um modo geral todo o processo de tratamento, prevenindo também eventuais danos causados na superfície do maciço causados pelo equipamento de construção.

3.5. CONTROLO DE QUALIDADE

A completude e a qualidade de um programa de injeção começam com um planeamento do tratamento e um conhecimento claro das características do maciço a injetar. Para tal, devem ser feitos esforços no sentido de monitorizar, cuidadosamente e com exatidão, os trabalhos de execução ao longo de toda a sua duração, efetuando-se adaptações, tais como as ditadas pela observação do comportamento da calda injetada.

Se todos estes aspetos forem devidamente considerados, é quase garantida a obtenção de um resultado final de qualidade. Se, no entanto, como acontece muitas vezes, as injeções têm início sem um conhecimento razoável das características do maciço e a monitorização realizada é fraca ou inexistente, é de esperar como resultado um tratamento também de qualidade fraca.

É possível dizer que o programa de controlo de qualidade de uma determinada empreitada pode ser dividido em três fases, sendo elas:

- i. Antes da injeção - o controlo de qualidade é focado na avaliação das características das caldas que serão utilizadas, bem como no comportamento do maciço a tratar;
- ii. Durante a injeção - os aspetos principais a monitorizar incluem as pressões utilizadas e os volumes e caudais de caldas injetados;
- iii. Após a injeção - tem como objetivo o conhecimento do comportamento da obra ou dos seus elementos, dando-se especial atenção à avaliação da segurança da mesma e, na fase de serviço, à sua funcionalidade (Silva Gomes, 2002).

Esta última fase já se encontra para lá do âmbito desta dissertação, não sendo portanto abordada, encontrando-se um estudo mais detalhado que abrange aspetos desta fase presente nos trabalhos de Silva Gomes (2002) e Raposo (2011).

Apresentam-se seguidamente descrições resumidas das duas primeiras fases do controlo de qualidade associadas à execução de uma cortina de impermeabilização.

3.5.1. Antes da injeção

3.5.1.1. Qualidade da calda

Requisitos específicos dos materiais são comuns em construção, e muitas especificações tendem a ser igualmente precisas no que toca ao controlo de caldas para injeção, mesmo que não seja sempre necessário. Embora a resistência seja um dos parâmetros mais importantes na grande maioria das caldas à base de cimento, é relativamente pouco importante no que toca a injeções de permeação para impermeabilizar o maciço, onde a resistência à retração e a exsudação são os parâmetros mais importantes.

Descrevem-se em seguida, na tabela 3.1 os diferentes ensaios utilizados, quer em laboratório, quer no campo, para a determinação das várias características pertinentes das caldas utilizadas.

Tabela 3.1 - Ensaios para o controlo de qualidade das caldas (adaptado de Chuaqui e Bruce, 2003)

Equipamento	Parâmetro avaliado	Descrição sucinta
Cone de Marsh	Viscosidade aparente	O ensaio é realizado enchendo o cone de Marsh normalizado SIMR até ao topo e medindo o tempo que 1 l de calda demora a fluir pelo funil.
Penetrómetro ou molinete*	Coesão e tempo de presa	Quer o penetrómetro, quer os molinetes de laboratório são usados para medir o tempo necessário para a calda atingir o início da presa (coesão de 100 Pa) e presa (coesão de 1000 Pa).
Pressofiltro*	Coeficiente de pressofiltração	O ensaio é realizado vertendo 400 ml de calda no equipamento de ensaio, sendo a calda pressurizada de seguida até 0,7 MPa. O ensaio continua até toda a água ser removida da amostra. A fórmula utilizada para calcular este parâmetro encontra-se descrita na secção 2.3.3.4.
Proveta de 250 ml, graduada	Decantação	A capacidade de decantação da calda pode ser medida de acordo com o método ASTM C940 com uma proveta de 250 ml, graduada, ao fim de 2h.
Balança baróide	Peso volúmico	O peso volúmico de uma calda pode ser estimado com uma balança baróide, que consiste numa balança calibrada especificamente para o efeito.
Agulha de Vicat	Tempo de presa inicial e final	O tempo de presa inicial e final da calda pode ser determinado com a agulha de Vicat. Este dispositivo é colocado à superfície da amostra de calda e largada. O tempo de presa inicial é obtido quando a agulha penetra 25 mm, sendo que o tempo de presa final é obtido quando a agulha não penetra a amostra.

* Não utilizados em Portugal

3.5.1.2. Diagrafias durante a furação

O conceito de execução de diagrafias durante a furação (*MWD – Measurement While Drilling*) é simples na sua filosofia, relativamente direto na sua aplicação e de um valor inestimável para o projetista (Bruce, 2003) e baseia-se no facto que cada furo realizado no maciço é uma fonte de informação geotécnica sobre a atual ou potencial resposta do maciço ao tratamento. Este conceito é aplicável também aos furos de injeção.

Durante o tratamento, a informação pode ser obtida por dois meios: manual ou automático. De forma a ser o mais útil possível, a informação deve ser estudada e utilizada em tempo real, podendo ser correlacionada com a informação obtida de furos de prospeção adjacentes, tais como ensaios de permeabilidade e outras diagrafias em furos, entre outros, obtendo-se assim uma melhor caracterização do maciço. Segundo Weaver (1991), as informações mais importantes obtidas através desta filosofia de investigação são relativas “às exceções e aos inesperados”.

A obtenção de dados em tempo real permite a quantificação da perfurabilidade do maciço, podendo ser quantificada pela energia específica, segundo a equação:

$$e = \frac{F}{A} + \frac{2\pi NT}{AR} \quad (3.1)$$

onde,

e = energia específica (kJ/m³);

F = Impulsão (kN);

A = secção transversal do furo (m²);

N = velocidade de rotação (rev/s);

T = torque (kN-m);

R = velocidade de penetração (m/s).

Todos estes dados conferem ao operador uma elevada capacidade de diagnosticar qualquer problema durante o trabalho. Permitem também que o Projetista tome decisões racionais em relação a possíveis necessidades de adaptações em obra, de modo a assegurar que o objetivo do tratamento é cumprido.

3.5.2. Durante a injeção

O objetivo da monitorização de qualquer obra passa pela verificação de que as especificações impostas pelo Projetista estão a ser cumpridas e, na maioria das obras geotécnicas, especialmente naquelas onde os riscos associados se encontram principalmente na fase de construção, tendo em conta as perturbações que estas irão introduzir nas zonas envolventes e infraestruturas adjacentes, a observação na fase de construção é determinante (Silva Gomes, 1992).

Como tal, ao longo dos últimos anos tem sido verificado um desenvolvimento significativo no número e tipo de equipamentos de leitura, manuais ou automáticos, disponíveis em qualquer empreitada. No que toca à injeção de maciços rochosos, ficou provado que o recurso a sistemas de monitorização automáticos permite a execução de tratamentos mais efetivos, a preços mais reduzidos e em menos tempo (Bruce *et al.*, 2005). Como tal, não existem atualmente quaisquer motivos que justifiquem uma monitorização incorreta das injeções ou a falta de um ajuste célere dos parâmetros de injeção face a possíveis alterações nas condições do maciço.

De seguida serão descritos os equipamentos de leitura mais utilizados atualmente, no decorrer das injeções, bem como abordadas as vantagens que provêm da utilização de equipamentos de leitura automáticos.

3.5.2.1. Equipamentos de monitorização manuais

No decorrer do processo de injeção, existem dois tipos de equipamentos que são fundamentais para a execução de um tratamento eficaz. São eles os **manómetros** e os **caudalímetros**.

i. Manómetros

Estes equipamentos têm como função a leitura das pressões de injeção, quer de água quer de calda, e é através dessa leitura que todos os outros equipamentos serão controlados. Sendo uma parte essencial do processo de injeção, estes necessitam de ser capazes de efetuar leituras de elevada precisão (Warner, 2004).

A precisão de um determinado manómetro é definida como uma percentagem de todo o seu espectro de leitura. Regra geral, o primeiro e último quarto do espectro irão apresentar uma exatidão inferior quando comparados com a zona central do mesmo. Daí decorre que os manómetros para uma determinada empreitada devem ser selecionados de modo a que os valores das pressões espectáveis de serem medidas se encontrem na zona central do espectro de leitura. Os níveis de exatidão dos manómetros encontram-se normalizados, por exemplo no B40.1 da *American Society of Mechanical Engineers* – ASME (*op. cit.*).

ii. Caudalímetros

São equipamentos, como o nome indica, de leitura dos caudais de água ou calda injetados num determinado furo. Existem quatro tipos principais de caudalímetros, e são eles:

- De pressão diferencial;
- De deslocamento;
- De velocidade;
- Medidores de massa.

Destes, apenas um é utilizado em projetos de tratamento de fundações com caldas à base de cimento. São eles os caudalímetros eletromagnéticos, que se inserem no terceiro tipo mencionado (de velocidade)

Estes equipamentos podem ser utilizados com qualquer tipo de calda HMG, desde que estas apresentem condutividade elétrica, pois eles funcionam de acordo com a lei de indução eletromagnética de Faraday, que diz que será induzida voltagem quando um material condutor atravessar um campo magnético. A voltagem é então medida por eléctrodos espaçados instalados na

parede do tubo, servindo a calda circulante como condutor, sendo a diferença de voltagem medida entre os elétrodos diretamente proporcional ao caudal (*ib.*).

3.5.2.2. Equipamentos de monitorização automática

Estes sistemas recolhem os valores dos vários parâmetros necessários avaliar no decorrer das injeções, mostrando-os em seguida no ecrã do próprio equipamento, ou enviando os respetivos dados para um computador, onde serão compilados e analisados, em particular sob a forma gráfica.

As funções principais destes equipamentos passam por permitir ao técnico que se encontra a supervisionar a injeção, a leitura imediata dos vários parâmetros de injeção, em especial a relação entre os mesmos. Permitem também a criação de registos permanentes em tempo real e que o técnico inclua facilmente novos parâmetros de monitorização.

Existe uma grande gama destes equipamentos, disponibilizada por várias empresas do ramo. De seguida serão brevemente descritos os sistemas mais utilizados um pouco por todo o mundo (Weaver e Bruce, 2007):

- O sistema **Paguro**, da empresa RODIO, permite o registo em simultâneo de dados referentes a 10 estações de bombagem. Caso os limites estabelecidos em projeto para os diferentes parâmetros de injeção sejam ultrapassados, este sistema dá sinal de alarme, e quando o volume máximo de calda injetado é atingido, termina automaticamente a injeção;
- A empresa Häny vende o equipamento de leitura **HIR** com o *software* **HFR**, que permite que os dados recolhidos sejam armazenados num cartão de memória ou diretamente num computador. Esses dados podem ser processados ulteriormente, o que permite a realização de relatórios de atividade bem como apresentações gráficas e sumários de dados;
- O equipamento de leitura **LT3**, da empresa Jean Lutz, permite a recolha de dados de vários furos simultaneamente e pode ser ligado a um ecrã para facilitar a monitorização. Apresenta também luzes de aviso que podem ser programadas para ativar quando os valores de pressão, caudal ou volume desejados forem atingidos – trata-se do sistema mais utilizado em Portugal;
- A empresa Atlas Copco disponibiliza o equipamento de leitura, **CFP**, que apresenta os parâmetros de pressão e caudal em gráficos de barras. Tem associado o sistema LOGAC que apresenta informação adicional em tempo real e monitoriza vários furos ao mesmo tempo.

Em termos de vantagens, a utilização destes equipamentos, para além de diminuir os custos devido à redução do número de pessoas necessárias no local, a possibilidade de ligação a computadores ou outros equipamentos automatizados, reduz também o tempo necessário para a execução de operações como a medição de pressões ou das próprias injeções, tornando também mais célere todo o processo de registo e organização dos dados referentes ao processo de injeção.

Todo o procedimento executivo de uma cortina é então tornado mais eficaz pois os esforços podem ser focados em zonas problemáticas, sendo o tempo e dinheiro gastos no tratamento das zonas que apresentam piores características geotécnicas, ao invés de despendidos na verificação de resultados de zonas que apresentam melhores condições (Bruce *et al.*, 2008).

Os benefícios específicos referentes aos aspetos gerais abordados anteriormente, são os seguintes (*op. cit.*):

- Os dados em tempo real são obtidos em intervalos de tempo mais reduzidos (2-10 s *versus* 5-15 min);
- São eliminados fenómenos, como picos de pressão, no decorrer das injeções;
- Os dados obtidos são mais exatos;
- Podem ser utilizadas pressões de injeção mais elevadas com confiança;
- As respostas dos maciços a alterações no procedimento de injeção, quer mudanças de calda ou das pressões, são conhecidas mais rapidamente;
- Fenómenos de fracturação hidráulica são facilmente identificados;
- Permitem a obtenção de representações gráficas detalhadas e constantes de todo o processo de injeção;
- É possível a procura rápida de dados referentes a um parâmetro específico da injeção.

3.5.2.3. Observação da superfície

Para além da constante monitorização dos parâmetros de injeção, é também necessário implementar uma observação contínua da superfície do terreno e das estruturas adjacentes, caso existam, porque todo o processo de execução dos furos e injeção da calda impõem pressões elevadas no maciço, que podem dar origem a fenómenos já mencionados anteriormente, como é o caso de empolamentos à superfície.

Existe, atualmente, uma grande variedade de instrumentos capazes de quantificar movimentos de terrenos ou estruturas; no entanto, para serem eficazes, necessitam de ser capazes de monitorizar

grandes áreas e alertar, imediatamente, para a existência de qualquer tipo de movimento. Portanto, embora equipamentos convencionais possam ser úteis, usualmente não são satisfatórios para atuarem como a técnica principal de monitorização.

Embora não proporcionem indicações imediatas sobre a ocorrência de movimentos, costuma recorrer-se a instrumentos convencionais, úteis para a observação de grandes áreas, como marcas superficiais dispostas numa determinada área ou numa estrutura, com leitura por estações totais, podendo estas ser automatizadas para realizarem observações regulares, enviando os dados recolhidos para uma central onde serão então tratados. Instrumentos de leitura com recurso a lasers, em combinação com vários alvos, podem também ser utilizados para registar eventuais movimentos verticais.

Embora estes equipamentos possam ser úteis, existem várias limitações à sua utilização. A exatidão dos valores obtidos varia bastante entre os diferentes instrumentos, e no caso de equipamentos de menor custo, esta é geralmente insatisfatória. Outra das limitações consiste no facto de todos eles necessitarem de ser montados em superfícies suficientemente seguras, de modo a não serem afetados pelo vento.

Contudo, mesmo os equipamentos mais sofisticados não proporcionam, quer uma medição adequada do movimento, quer o movimento total acumulado medido. No entanto, não são apenas os equipamentos caros e complexos que são utilizados na monitorização de deslocamentos.

Dispositivos simples e económicos também podem constituir ferramentas eficazes, por exemplo, varas de aço, cravadas em menos 50 cm do seu comprimento no terreno, colocadas na área de influência da injeção, fazendo uma malha, a uma determinada distância de fios de aço, paralelos e entrecruzados que passam por cima dos varões, mas que estão ancorados em zonas não afetadas pela empreitada da cortina. Com o decorrer das injeções, são medidas as distâncias entre os fios e o topo dos varões, nomeadamente com uma fita métrica. Caso se verifique uma alteração nessa distância, fica comprovada a existência de empolamento do terreno (Silva Gomes, 2012).

Para uma medição mais exata dos resultados desses empolamentos, geralmente sob a forma de fissuras no terreno, podem ser utilizados outros equipamentos como bases de alongâmetros, fissurómetros ou réguas de fendas, entre outros.

3.5.3. Verificação da eficiência

Não existe qualquer método capaz de verificar exatamente a eficácia do tratamento implementado antes do enchimento da albufera. Por um lado, a execução de ensaios de absorção de água tipo Lugeon, entre furos de fiadas de ordem sucessiva são úteis como guia no decorrer do tratamento, dando uma ideia da redução da permeabilidade, no entanto estes dados não podem ser tomados como confirmação da eficácia total do tratamento.

Adicionalmente, poder-se-ão, ainda executar medições da velocidade de propagação de ondas sísmicas, P e, em especial, S, antes e depois da execução das injeções de impermeabilização e, assim, comparar o ganho de velocidade obtido após o tratamento, por colmatagem dos vazios do maciço.

No entanto, o único teste conclusivo passa pelo enchimento da albufera, com a observação constante da pressão e caudal da rede de percolação existente, no decorrer e após o enchimento, sendo necessário para tal observação de um elevado número de piezómetros. A fundação da barragem deve ser separada em várias zonas de medição de modo a ser possível identificar os caminhos de percolação mais importantes.

Assumindo a existência de poços de bombagem e respetivos acessos, qualquer zona do maciço que apresente características inaceitáveis no decorrer do enchimento pode então ser tratada atempadamente. No caso de barragens de aterro e como referido na seção 2.6, a existência de galerias sob a fundação da barragem é considerada fundamental por Weaver e Bruce (2007) para a execução de tratamentos adicionais, sendo o seu custo compensado pelas poupanças produzidas por este método.

3.5.4. Durabilidade do tratamento

Através da monitorização de variadas obras ao longo do tempo, foi possível constatar que algumas das cortinas de impermeabilização tinham praticamente desaparecido após algumas décadas (Houlsby, 1982), sendo que as caldas à base de cimento finas utilizadas na execução destas tinham sido removidas pelas redes de percolação existentes.

Para que o ataque às caldas tivesse sido bem-sucedido, foram necessárias duas condições (*op. cit.*):

- A utilização de material de fraca qualidade, delimitado incorretamente pelas cortinas;
- A existência de fenómenos de percolação através da cortina.

Esta segunda condição foi atingida através da concretização de diferentes cenários:

- Utilização de pressões de injeção inferiores às cargas hidráulicas a que a cortina iria estar sujeita;
- Retração da calda, o que levou a abertura de caminhos para a água percolar;
- Vazios deixados pela água proveniente da exsudação da calda.

Em casos onde apenas se pretenda obter uma redução temporária da permeabilidade do maciço, o cenário de lavagem da calda não necessita de ser considerado; no entanto, em muitos casos, a necessidade de reinjecção da cortina após alguns anos pode acarretar consequências pesadas na economia do projeto.

Estes aspetos devem, portanto, ser considerados pelo Projetista, mesmo que se reconheça que estes problemas não são de fácil quantificação e que muitas vezes apenas experiências prévias possam ajudar na sua resolução

4. METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO

Neste capítulo descrevem-se algumas das metodologias de dimensionamento mais utilizadas atualmente. Estas metodologias englobam aspetos mencionados nos dois capítulos anteriores, sendo que, em cada uma delas, são utilizados diferentes conjuntos de valores, quer de pressões de injeção, volumes máximos a injetar ou mesmo diferentes tipos de caldas, com características específicas a cada metodologia, variando de autor para autor. Os métodos descritos são os seguintes: Houslby (1976; 1990), Silva Gomes (1991); GIN (Lombardi e Deere, 1993) e William e Dreese (1998).

4.1. MÉTODO DE HOUSLBY (1976; 1990)

A metodologia de dimensionamento proposta por Houslby em 1976 e atualizada em 1990 é a mais antiga metodologia em uso por todo o mundo.

4.1.1. Avaliação da necessidade de tratamento

O esquema da figura 4.1 identifica os principais pontos a ter em conta, aquando da tomada de decisões sobre os máximos valores de permeabilidade aceitáveis para uma determinada obra. Segundo Houslby (*op. cit.*), este esquema é apenas um guia geral, e como tal, serve apenas para direcionar a linha de raciocínio, sendo necessário adaptá-lo a cada uma das suas aplicações.

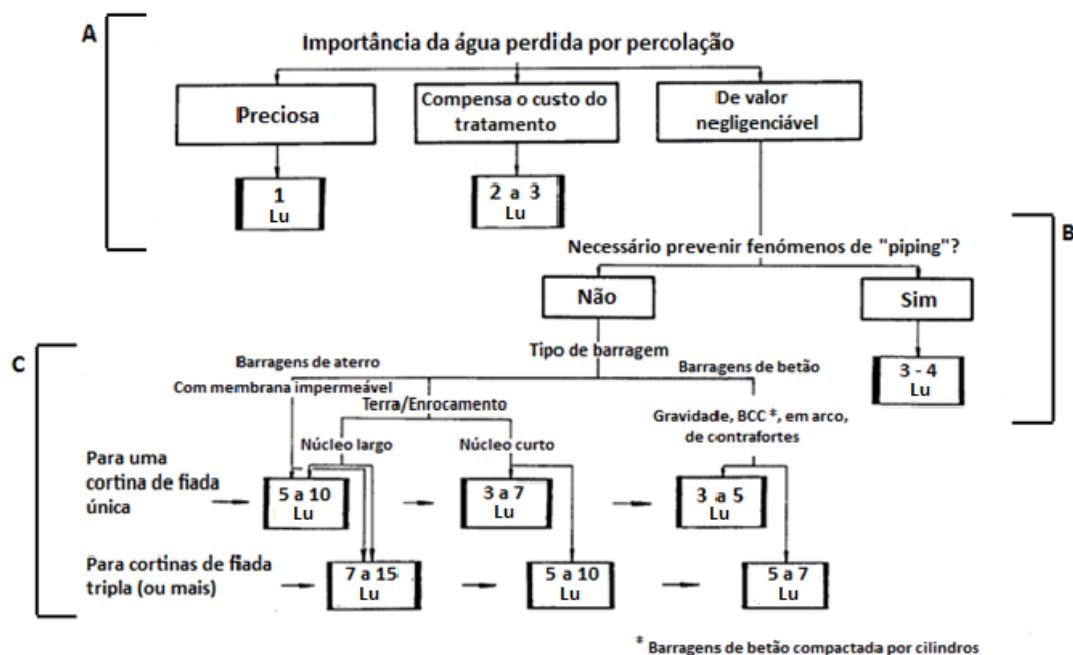


Figura 4.1 - Fluxograma para definição da necessidade de execução de cortina de impermeabilização (adaptado de Houlby, 1990)

O sub-esquema da figura 4.1-A oferece uma orientação, em termos de absorção de água em unidades Lu, em relação à pergunta “quando é o tratamento necessário?”. Estes valores representam o limite de permeabilidade aceitável para cada situação. Qualquer parte da fundação que tenha uma permeabilidade natural superior à admissível deverá ser tratada, sendo de realçar que, a profundidades mais elevadas, os limites de permeabilidade não necessitam de ser tão restritos, devido à melhoria da qualidade do maciço e à diminuição do gradiente hidráulico.

Do ponto de vista económico, é fundamental definir quão importante é a água que se perde por percolação sob a barragem. Em ambientes desérticos ou em outras situações onde a água é escassa, e portanto preciosa, qualquer perda de água é inaceitável. Nestas situações, a cortina de impermeabilização construída no local terá de atingir um limite de permeabilidade de 1 Lu.

Em casos onde a água será bombeada para armazenamento com elevados custos, tal como em sistemas de contra embalse, perdas de água representam perdas de dinheiro. Estas perdas, ao longo da vida útil dos projetos, devem ser comparadas com os custos de tratamento do maciço. Caso o tratamento seja escolhido, será provavelmente necessária a adoção de um limite de permeabilidade na ordem dos 2 a 3 Lu de modo a minimizar as perdas de água até valores negligenciáveis. Quando a água perdida por percolação natural já se encontra na ordem dos 2 a 3 Lugeon, o esquema conduz ao próximo ponto.

A figura 4.1-B é referente à possibilidade de ocorrência de fenómenos de “*piping*” em materiais de fraca qualidade, geralmente atuando como preenchimento de falhas e outros defeitos. Se este fenómeno for de ocorrência provável devido à pressão de percolação, deverão ser tomadas precauções para a minimizar. Um limite de permeabilidade na ordem de 3 a 4 Lu é o ideal, sendo também possível a execução de uma cortina com múltiplas fiadas. Caso nenhum dos problemas enunciados anteriormente sejam aplicáveis, as considerações focam-se no tipo de barragem a construir (figura 4.1-C). As barragens de aterro, nos seus diversos tipos encontram-se no lado esquerdo, e as barragens de betão no lado direito.

Para barragens zonadas de núcleo amplo e cortina de fiada única, o tipo mais comum, o limite de permeabilidade situa-se entre 5 e 10 Lu, sendo o valor exato dependente de fatores locais. Caso a cortina seja constituída por três ou mais fiadas o limite por ser aumentado para 7 a 15 Lu.

Ainda para barragens de aterro, mas com núcleo mais delgado, os valores dos gradientes hidráulicos nos fenómenos de infiltração podem ser elevados, sendo então necessários limites de permeabilidade mais reduzidos, nomeadamente 3 a 7 Lu para cortinas de fiada única e 5 a 10 Lu para cortinas de fiada múltipla.

Estes gradientes hidráulicos podem ser ainda mais elevados no caso de barragens de enrocamento com membrana impermeável no paramento de montante; no entanto estas não apresentam o perigo de fuga de material do núcleo para as descontinuidades na fundação e, portanto, os limites impostos podem ser aligeirados neste caso.

No caso das barragens de betão, e assumindo que as condições de drenagem nas fundações são adequadas, caso contrário são necessários limites mais baixos, os níveis de permeabilidade aceitáveis rondam entre 3 e 5 Lu para cortinas de fiada única e 5 a 7 Lu para cortinas com fiadas múltiplas.

4.1.2. Pressões de injeção a utilizar

Na figura 4.2 é possível observar um gráfico onde estão indicadas as pressões a adotar para condições normais de injeção. O objetivo consiste na aplicação da pressão máxima de injeção que o maciço aguenta sem fraturar, de modo a se atingir a máxima capacidade de penetração da calda.

É de relembrar que existem exceções e variações a esta regra; algumas fundações irão suportar pressões mais elevadas, enquanto que em outros casos é necessária uma redução da pressão.

As pressões indicadas na figura 4.2 são medidas à superfície e relacionadas com a distância ao fundo do furo ou trecho a ser injetado, sendo a pressão máxima recomendada de 1 MPa para rochas médias a fracas.

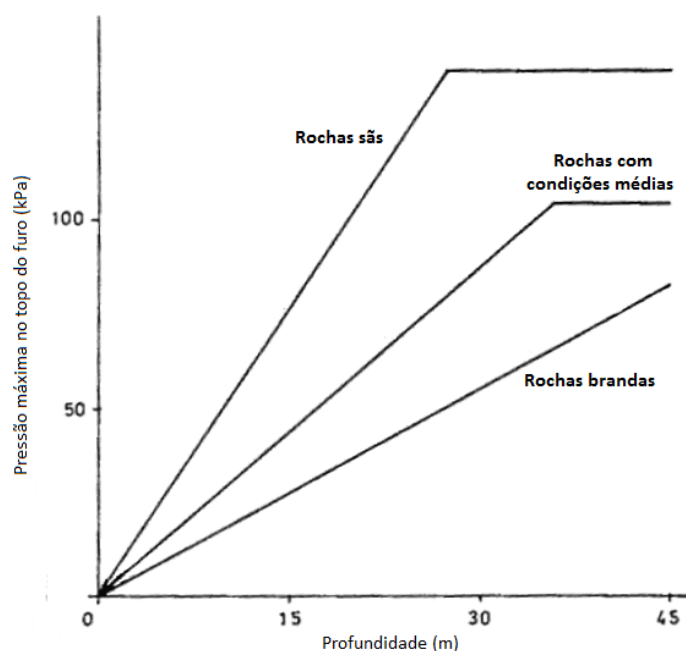


Figura 4.2 - Pressões de injeção admissíveis para diferentes tipos de rochas (adaptado de Houslby, 1990)

4.1.3. Volumes de calda a injetar e a sua relação A/C

Segundo Houslby (1990), não existe necessidade de utilizar outros traços de mistura (A:C) do que os seguintes:

$$5:1 \rightarrow 4:1 \rightarrow 3:1 \rightarrow 2:1 \rightarrow 1:1 \rightarrow 0,8:1 \rightarrow 0,6:1 \rightarrow 0,5:1$$

Estes traços apresentam um incremento adequado de viscosidade, sendo que outros traços conferem um aumento negligenciável no controlo da viscosidade, tornando apenas os trabalhos mais dispendiosos.

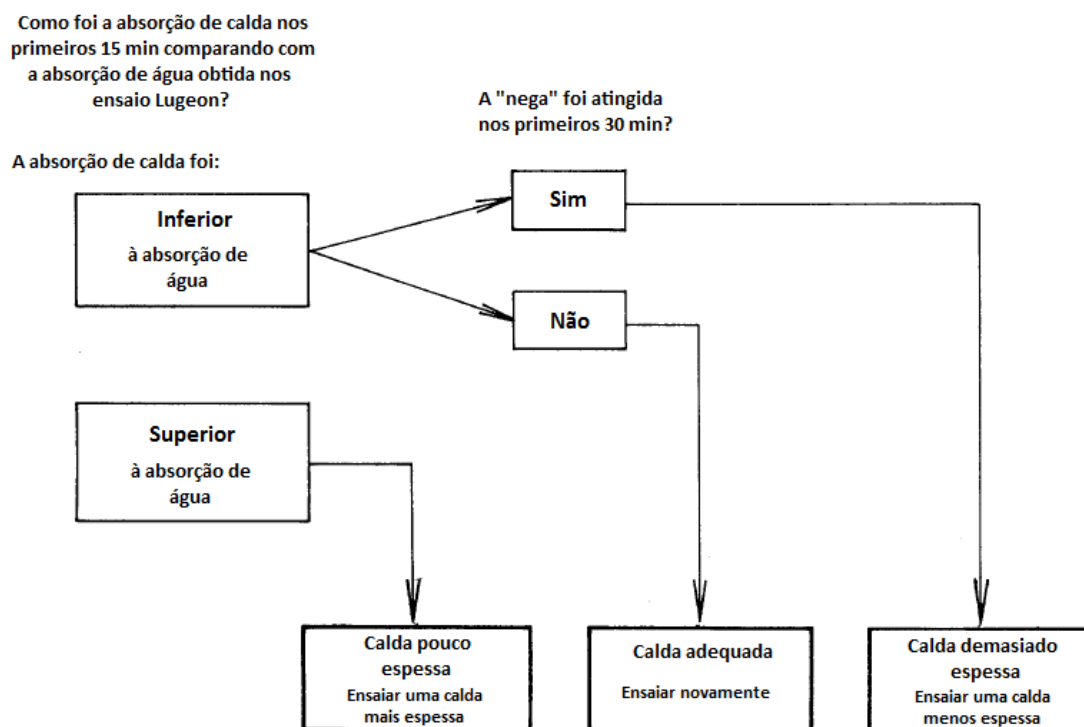
Houslby (*op. cit.*) considera ainda que, no decorrer das injeções, ao espessar as caldas, nunca se deve saltar um dos traços. Por exemplo, quando se pretende espessar uma calda com um traço 3:1, deve-se passar primeiro para um de 2:1 e depois para 1:1. Caso contrário poder-se-á induzir fracturação no maciço. Através da execução de ensaios e observações do comportamento de várias caldas utilizadas na construção de cortinas em várias barragens, Houslby (*op. cit.*) concluiu que uma calda com um traço de 3:1 iria ter maior capacidade de preenchimento de descontinuidades com menos de 1,5 mm de abertura. Para além disso, e devido ao facto de caldas com um traço de 1:1 penetrarem apenas 0,3 m no maciço, estas não eram as mais adequadas ao preenchimento

descontinuidades finas, sendo no entanto ideais para preencher descontinuidades de maior abertura.

Após a adoção de um determinado traço para a realização de uma mistura inicial, Houslby (*ib.*) sugere a utilização do fluxograma apresentado na figura 4.3 para facilitar a determinação do traço mais apropriado a uma determinada intervenção.

O princípio geral de tratamento utilizado consiste em iniciar a injeção com a calda mais espessa possível capaz de penetrar adequadamente nas descontinuidades injetáveis mais finas. Não é correto iniciar a injeção com uma calda demasiado espessa que irá imediatamente obstruir a entrada das descontinuidades sem as penetrar. Do mesmo modo, a utilização de caldas demasiado finas irá resultar num tratamento de fraca qualidade.

É neste momento que os resultados de trabalhos de prospeção realizados corretamente irão ser muito úteis, pois deverão ter sido obtidas estimativas muito próximas da realidade no que toca às dimensões das descontinuidades presentes.



Figura

4.3 - Fluxograma para definição dos traços iniciais das caldas (modificado de Houslby, 1990)

4.2. MÉTODO DE SILVA GOMES (1991)

A metodologia de tratamento de fundações rochosas de barragens proposta por Silva Gomes (1991) foi apresentada como uma possível alternativa aos métodos convencionais de tratamento até essa data utilizados, caracterizados pelo uso do princípio designado de *split spacing*, associado à utilização, nos furos de todas as ordens (primários, secundários, etc.), e em todos os trechos, de caldas sucessivamente mais espessas. Para além de outros aspetos importantes, é quanto a este último que a metodologia proposta por Silva Gomes (op. cit.) mais se distingue da metodologia convencional.

É de salientar que a metodologia proposta consistiu apenas numa formulação teórica, não tendo sido ainda implementada em qualquer obra. Como qualquer nova metodologia, da sua aplicação prática, desde que aceite pelos autores dos projetos, resultaria a possibilidade de apreciar os resultados obtidos em condições reais e, eventualmente, a sua validação.

Admitindo que os custos associados à execução de ensaios de injectabilidade na fase de estudos de apoio ao projeto poderiam ser inoportáveis para o Dono de Obra, atendendo à necessidade de montagem de um estaleiro mais pesado do que o exigido para a furação e para a execução dos ensaios de absorção de água, uma situação que não implicaria a assunção de um risco demasiado elevado poderia consistir na aplicação da metodologia proposta à execução de um bloco experimental no início do tratamento da fundação de uma barragem de média dimensão.

4.2.1. Conceitos gerais

Ao contrário dos métodos convencionais, que abordam a injeção das diferentes ordens de furos realizados segundo o método “split spacing” do mesmo modo, Silva Gomes (op. cit.) considera que a cada ordem de furos (primários, secundários, etc.) devem corresponder funções e objetivos específicos (figura 4.4.).

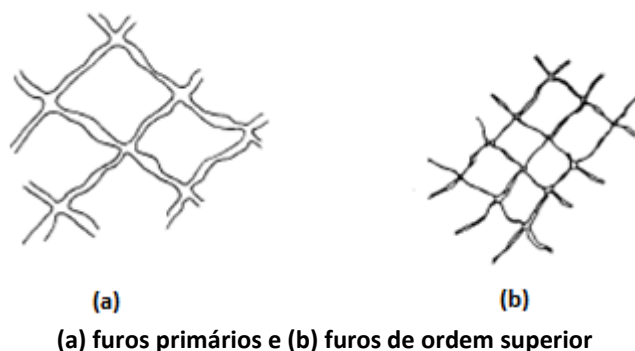


Figura 4.4 - Abertura de descontinuidades tratadas por sequências de furos de injeção segundo o método de Silva Gomes (adaptado de Houlby, 1990)

Assim, as descontinuidades com maior condutividade hidráulica deverão ser tratadas com uma única calda, de composição a determinar de acordo com as características do maciço e com os resultados dos ensaios de absorção de água tipo Lugeon, mas a que corresponderá a menor relação água/cimento - por exemplo, 1:1 com 3% de bentonite, a que se poderá adicionar um superplastificante, a partir dos trechos dos furos primários.

O preenchimento das descontinuidades de condutividade “intermédia”, cujo tratamento ficou propositadamente incompleto na fase de injeção dos furos primários, será assegurado pelo tratamento efetuado a partir dos furos secundários, com uma calda mais fluida - por exemplo, 2:1 com 3% de bentonite, a que se poderá também adicionar um superplastificante. Admitindo ainda que, com a injeção dos furos secundários, não se obtiveram valores inferiores à permeabilidade admissível, prossegue-se o tratamento para os furos terciários com caldas ainda mais fluidas - por exemplo, 3:1 com 3% de bentonite.

Importa salientar que, tal como preconizado com êxito no método de Houlby, a permeabilidade admissível deve ser função do tipo de barragem, do valor da água perdida por percolação e da profundidade.

Admitindo a possibilidade de uma aplicação nas condições acima referidas, considera o autor ser da maior importância que os dois furos primários adjacentes do bloco experimental sejam carotados e ensaiados com ensaios de absorção de água do tipo Lugeon o que permitirá, em conjugação com os resultados obtidos na fase de estudos de apoio ao projeto, obter uma informação mais pormenorizada sobre as características do maciço que contribuam para a redefinição da disposição dos furos da cortina e, em particular, do espaçamento dos furos primários, de modo a procurar assegurar que, com o respetivo tratamento por caldas espessas, se atinge o objetivo pretendido – preencher as descontinuidades com maior condutividade para que o alcance da calda, no plano normal à percolação, seja o adequado, isto é, que a “geometria” seja de ordem tal que, para além

dos preenchimentos provenientes desses furos sejam tanto quanto possível secantes, e não se verifiquem consumos excessivos na direção normal àquela (Silva Gomes, *op. cit.*).

Considerando que, a exemplo do que acontece com a aplicação da metodologia convencional, é de toda a conveniência que todos os furos primários da cortina sejam carotados, no bloco experimental sugerido também o furo secundário deveria ser igualmente carotado. Esta disposição visa, de acordo com o autor, avaliar a eficiência relativa do preenchimento das descontinuidades com condutividade mais elevada. De facto, se a metodologia proposta funcionar, verificar-se-á que as descontinuidades mais abertas foram preenchidas, enquanto que as de menor condutividade continuam, como se espera, por preencher.

A implementação da metodologia proposta implica a definição de vários parâmetros que serão objeto de consideração nos pontos seguintes: pressões de injeção, tipos de calda e verificação da eficiência do tratamento no final da sua execução.

4.2.1.1. Pressões de injeção

A problemática das pressões associadas aos ensaios de absorção de água e à injeção das caldas tem, como é bem conhecido, contornos diferenciados. Neste contexto, será de mencionar que, a menos da possibilidade da aplicação a um bloco experimental e das eventuais primeiras aplicações da metodologia preconizada por Silva Gomes (*ib.*), e tal como é habitual no tratamento das fundações rochosas de barragens, a carotagem dos furos e os ensaios de absorção de água apenas se justificam nos furos primários e nos furos de verificação.

As pressões a utilizar nos ensaios de absorção de água nos diferentes trechos deverão ter em conta as tensões resultantes do peso próprio dos materiais sobrejacentes (maciço rochoso e, se for o caso, parte da barragem já construída). De facto, a aplicação de pressões em superfícies sub-horizontais de dimensão apreciável, traduz-se em forças ascensionais significativas, podendo originar fenómenos de levantamento e/ou de fracturação hidráulica.

O mesmo não acontece, em regra, com as pressões de injeção das caldas, especialmente quando estas são muito espessas. De facto, as pressões dissipam-se rapidamente à medida que a calda se afasta da superfície de interseção do furo com a descontinuidade, pelo que as pressões apenas assumem os valores especificados na vizinhança dessa superfície, não desenvolvendo, por isso, forças significativas. Por outro lado, outra condição a reter é a que atrás se referiu, relativa ao alcance que se pretende para as caldas espessas, o que conduzirá, em regra, à utilização de pressões

que, conjugadas com a reologia das caldas, permitam atingir o objetivo pretendido – preencher as descontinuidades com maior condutividade hidráulica em todo o espaço entre os furos primários adjacentes.

As pressões a utilizar nas caldas mais fluidas devem atender ao mesmo tipo de questões, admitindo-se, contudo, que devam ser superiores aos valores usados nos ensaios de absorção de água atendendo a que, não só o maciço está mais consolidado, por efeito do preenchimento prévio das descontinuidades mais abertas, como a viscosidade das caldas é significativamente superior à da água, mesmo que se adicionem superplastificantes.

Uma delas consiste no facto que podem ser utilizadas pressões de injeção mais elevadas do que aquelas obtidas através da execução de ensaios de absorção tipo Lugeon. Isto porque o material utilizado nestes ensaios (água) é um fluido newtoniano, e como tal, consegue-se propagar em grandes áreas a baixas pressões, ao contrário das caldas que serão utilizadas, que apresentam comportamentos binghamianos.

Por exemplo, no caso de maciços graníticos, a família mais delicada de injetar é a sub-horizontal atendendo a que será nesta família que mais facilmente serão geradas forças de levantamento hidráulico com pressões de injeção que superem as tensões resultantes do peso próprio do maciço e da parte da barragem eventualmente já construída (secção 2.4.1.2.).

4.2.1.2. Tipos de calda a utilizar e sua relação A/C

Ao contrário dos métodos convencionais, onde geralmente, recorrendo ao *split spacing* se utilizam inicialmente caldas finas (3/1) procedendo-se ao seu espessamento ao longo da execução dos furos de ordem superior, Silva Gomes (1991) propõe a metodologia inversa, já apresentada em linhas gerais.

Parece evidente que, ao iniciar a injeção dos furos primários, de acordo com o método convencional como, aliás, com toda a restante série de furos, com caldas fluidas, por exemplo de 3/1, a maior parte dessas caldas vai ser absorvida pelas descontinuidades com maior condutividade, o que resulta numa eficiência reduzida e num consumo que só não é excessivamente elevado, porque o Projetista limita, à partida, o volume máximo a injetar. Pode dizer-se que, em regra, essa calda alcança distâncias, nas várias direções e, em particular na direção normal à direção da percolação, que não contribuem para o resultado pretendido. É claro que, com o espessamento sucessivo das caldas, se

acaba por preencher as descontinuidades com maior condutividade hidráulica, sendo que se verificou já uma utilização pouco eficiente das caldas mais fluidas anteriormente injetadas.

De acordo com o exposto, e na sequência do já anteriormente referido, preconiza-se que os furos primários sejam injetados com caldas estáveis espessas, do tipo das acima sugeridas, cuja composição é determinada pelos resultados dos ensaios tipo Lugeon, combinados com o conhecimento das características do maciço. Daí que Silva Gomes (*op. cit.*) refira ser a carotagem dos furos primários tão importante.

Um aspeto a ter em conta e que raras vezes é mencionado, inclusive na utilização do método convencional, é o seguinte: embora as descontinuidades com menor condutividade hidráulica não sejam, em regra, devidamente injetadas a partir dos furos de ordem inferior (primários e secundários), elas ficam parcialmente obturadas, impedindo assim a sua injeção futura a partir desses furos. Há justificações para a eventual injeção complementar a partir de um furo já injetado e reperfurado, mas a discussão pormenorizada desta problemática excede o âmbito da matéria que aqui se pretende tratar.

Nos furos de ordem superior, utilizam-se as caldas menos espessas, do tipo das referidas anteriormente, permitindo assim atingir, em regra, descontinuidades mais fechadas do que as tratadas nos furos primários.

Caso seja necessária a execução de furos terciários são utilizadas caldas suficientemente fluidas, como referido, para injetar as descontinuidades mais fechadas existentes no maciço.

4.2.1.3. Verificação da eficiência do tratamento

A verificação da eficiência do tratamento é, em regra, efetuada mediante a execução de “furos de verificação” que cruzam, no respetivo plano, os furos incluídos no tratamento. Esta metodologia oferece também algumas objeções. De facto, auscultam-se, em cada furo de verificação, zonas diferentes da cortina – as mais próximas da superfície envolvendo um conjunto de furos e, à medida que a profundidade aumenta, furos diferentes.

Neste contexto, Silva Gomes (1991) propõe uma alternativa que consiste na execução de furos de verificação paralelos aos furos executados no tratamento que envolvam zonas em que, em face dos resultados obtidos, absorções de calda relativamente elevadas nos furos, se admita que o tratamento não ficou devidamente concluído.

Como referido, os furos devem ser carotados, objeto de ensaios de absorção de água e injetados; nos trechos nos quais tenham ocorrido valores de absorção de calda elevados, com caldas apropriadas às características do maciço e aos valores dos ensaios de absorção de água obtidos nos trechos correspondentes

Um último aspeto a considerar diz respeito aos critérios de fecho da cortina. Na opinião de Silva Gomes (Silva Gomes, 2012), se os valores da permeabilidade residual forem superiores aos da permeabilidade admissível em função da existência de descontinuidades insusceptíveis, pela sua abertura, de serem injetadas com as caldas de cimento mais fluidas, não deve recorrer-se à utilização de microcimentos e, muito menos, de resinas. De facto, tais descontinuidades serão necessariamente muito fechadas e, por isso, responsáveis pela percolação de caudais muito pequenos, embora, eventualmente, pela instalação de pressões que possam afetar a segurança da barragem. O problema resolve-se preferencialmente com a execução de drenos que intersectem essas descontinuidades dado que, com a respetiva execução, se consegue simultaneamente reduzir drasticamente as pressões, sem que os caudais afluentes à boca dos drenos sejam significativos.

No âmbito do controlo da percolação nas fundações rochosas de barragens deve ter-se em conta, como orientação de carácter geral, a que o que ficou dito procura obedecer, que as injeções se destinam essencialmente a controlar caudais e a drenagem a controlar pressões.

A título de exemplo, uma descontinuidade sub-horizontal muito fechada, que atravessasse toda a cortina de impermeabilização, na qual não foi possível injetar um volume mínimo de calda à base de cimento “normal”, devido à dimensão máxima dos grãos de cimento, pode ser responsável pela instalação de pressões praticamente iguais à pressão da albufeira numa superfície muito extensa. A execução de um dreno que a intersecte reduz a pressão para a que corresponde à pressão à boca, sendo que o caudal afluente a ela é, pelas condições associadas, muito pequeno, não representando, por isso, qualquer problema económico, mesmo no caso da evacuação dos caudais ser feita por bombagem.

4.3. MÉTODO GIN (Lombardi e Deere, 1993)

4.3.1. Conceitos gerais

O conceito de intensidade de injeção foi introduzido por Lombardi & Deere (1993) e é baseado na ideia que a possibilidade de empolamento do terreno, o risco de ocorrência de fenómenos de fracturação ou levantamento hidráulico, a distância de penetração de uma determinada calda ou, em

termos gerais, qualquer redução dos benefícios obtidos através da execução de injeções de calda de cimento correspondem a uma combinação das propriedades da calda utilizada, da pressão aplicada e dos volumes injetados.

É possível afirmar que a probabilidade de ocorrência de danos estruturais num determinado maciço será mais elevada quando for adotada uma combinação de pressões de injeção elevadas bem como elevados volumes de injeção. Por outro lado, a utilização de volumes de injeção elevados a pressões reduzidas, ou vice-versa, raramente irão provocar complicações.

Baseado nestas considerações, o GIN (*Grout Intensity Number*) ou “Número de intensidade de injeção” foi então definido como sendo o produto do volume de calda injetada num trecho de um 1 m com a pressão de injeção correspondente, aquando da paragem da injeção, ou seja, a um caudal nulo (equação 4.1):

$$GIN = p \cdot V \text{ (kPa} \times \text{l/m)} \quad (4.1)$$

O principal objetivo da utilização do GIN passa pela limitação da pressão de injeção segundo um determinado GIN definido, prevenindo assim qualquer combinação excessiva de volumes e pressões que possam causar danos no maciço, como é possível observar na figura 4.5.

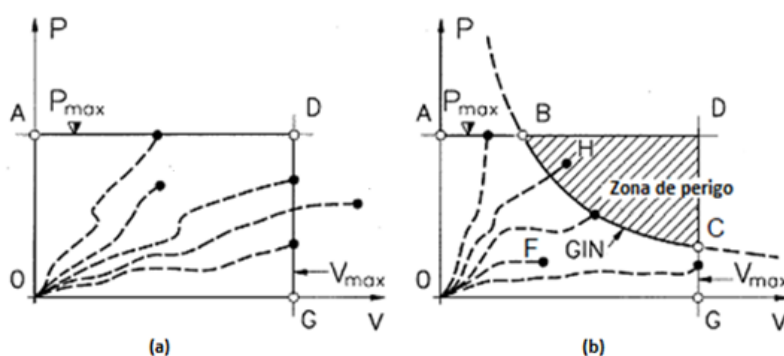


Figura 4.5 - Limites impostos ao processo de injeção pelo método (a) tradicional, ADG, e (b) GIN, ABCG (adaptado de Lombardi, 2003)

4.3.2. Definição do GIN

É de notar que, para além do limite correspondente à curva GIN, e tal como nos métodos convencionais de injeção, é necessária a imposição de limites máximos de pressão e volume de calda a injetar, bem como a relação A/C desta.

4.3.2.1. Valor GIN

Devido ao número elevado de variáveis desconhecidas do maciço a tratar, tais como tipos de descontinuidades e todas as suas características associadas, deformabilidade do maciço e sua condutividade hidráulica, é impossível definir teoricamente valores GIN antes do início da empreitada.

Lombardi (1996) sugere dois métodos possíveis para definir um valor GIN apropriado:

- a) O método experimental, que passa pela execução de ensaios de injectabilidade em cada zona do maciço rochoso que possa ser considerada como homogênea, medindo a penetrabilidade da calda injetada como uma função de diferentes valores GIN. Após a definição, com alguma exatidão, de uma penetrabilidade de teste, R_t , e aplicando as equações 4.2 e 4.3:

$$K = R_t \times \sqrt[3]{(c_t / GIN_t)} \quad (4.2)$$

$$GIN = \frac{c \times R^3}{K^3} = \frac{c \times R^3}{c_t \times R_t^3} \times GIN_t \quad (4.3)$$

onde c corresponde à coesão da calda utilizada e K a um fator de injectabilidade geral que engloba todas as variáveis desconhecidas abordadas anteriormente, é possível obter um valor GIN.

- b) O segundo método é observacional, onde o processo de injeção é iniciado com a definição empírica de um GIN com base em experiências anteriores ou em dados bibliográficos. Este valor é então ajustado ao longo do processo de injeção, de acordo com os dados obtidos nas injeções preliminares.

Na figura 4.6 é possível observar alguns GIN de referência, definidos através da experiência obtida ao longo de várias obras pelo autor, podendo ser chamadas de curvas limite padrão ou curvas guia.

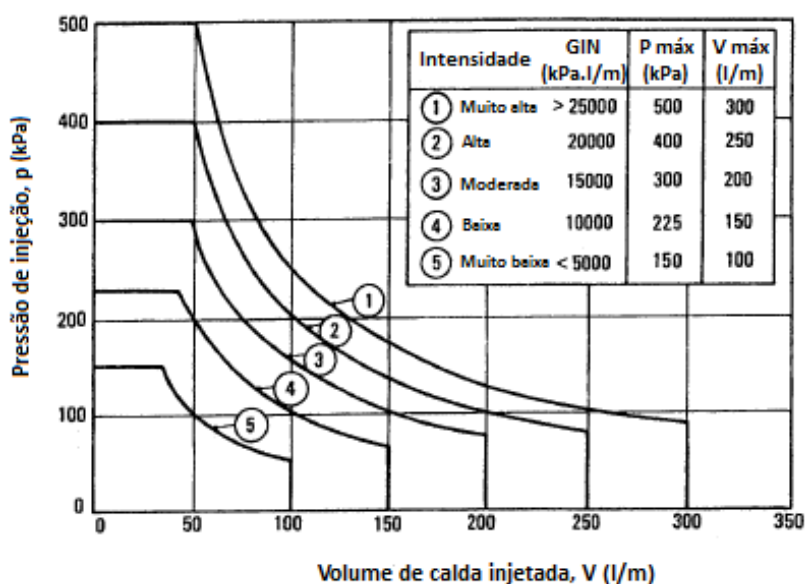


Figura 4.6 - Conjunto de curvas GIN padrão (adaptado de Lombardi, 1996)

4.3.2.2. Pressões de injeção a utilizar

O valor da pressão de injeção máxima é, em princípio, independente do valor GIN selecionado, e deve ser função dos objetivos do projeto, ou seja, do grau de impermeabilização que se pretende obter no maciço a tratar.

No caso em referência nesta dissertação, que consiste na aplicação do método GIN para a execução de uma cortina de impermeabilização, a pressão máxima selecionada para uma determinada zona deve estar relacionada com a pressão hidráulica espectável a que essa zona será exposta durante o tempo de funcionamento da obra. Uma relação de 2 a 3 vezes essa pressão hidráulica é geralmente adotada.

4.3.2.3. Volume de calda a injetar e sua relação A/C

Tal como no caso da pressão de injeção, a definição do volume máximo de calda a injetar deve ter como base as condições locais do maciço, tendo em conta o risco de perda de calda, quer por fuga desta para a superfície ou para alguma cavidade.

No entanto, este limite não deve ser visto como uma barreira, mas sim como uma indicação da necessidade de tomada de uma decisão, que poderá ser qualquer uma das seguintes (Lombardi, 2003):

- a) Continuação da injeção;
- b) Paragem definitiva;

- c) Paragem temporária, retomando-se a injeção posteriormente;
- d) Abandonar o furo e realizar outro próximo deste;
- e) Adicionar um produto à calda que lhe aumente a capacidade repelente de água (geralmente adjuvantes);
- f) Qualquer outra medida adequada.

No que diz respeito à definição do tipo de calda a utilizar, Lombardi e Deere (1993) favorecem a utilização de caldas estáveis, obtidas através da execução de um conjunto de ensaios de laboratório (ver secção 3.5.1.1.) e diferentes misturas com relações A/C preferencialmente entre 0,7/1 a 1/1.

O objetivo destes ensaios é a obtenção de uma calda única, homogénea, com as melhores características possíveis, adaptada às condições do maciço. Para a obtenção destas características pode-se recorrer à utilização de adjuvantes como (*op.cit.*):

- Superplastificantes, para reduzir a coesão e viscosidade da mistura, de modo a aumentar a penetrabilidade da calda;
- Agentes de retenção de água, de modo a reduzir a perda de água durante o processo de exsudação.

4.3.2.4. Relação entre o GIN e as características da calda

Como já foi mencionado anteriormente, a viscosidade de uma calda controla a velocidade de circulação desta, enquanto que a coesão influencia a distância máxima de penetração, para determinadas pressões aplicadas e aberturas das descontinuidades (ver secção 2.3.2.).

Outro aspeto já abordado, é que o GIN é referente ao final da injeção, onde a velocidade de circulação da calda é nula. É possível então dizer que o GIN se encontra relacionado apenas com a coesão daquela e, portanto, com a sua penetrabilidade. Através da análise da figura 4.7 é possível aferir que o GIN é aproximadamente proporcional à potência de terceira ordem da penetrabilidade. Como o GIN será sempre um valor aproximadamente constante, também a distância máxima de penetração da calda o será.

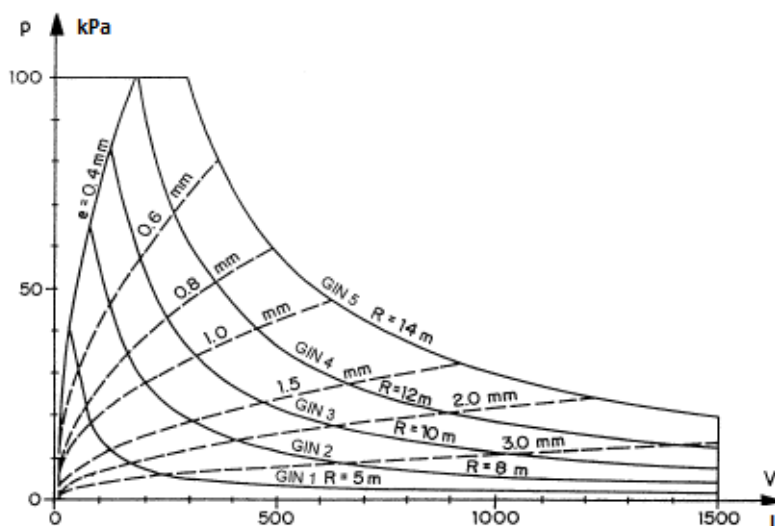


Figura 4.7 - Relação entre pressão, p , volume de calda injetado, V , abertura das descontinuidades, e , e penetrabilidade de uma calda, R (adaptado de Lombardi, 2003)

Outra das conclusões possível de retirar da figura 4.7, é que cada valor de penetrabilidade corresponde a um GIN, independentemente da abertura das descontinuidades. A explicação deste aspeto provém do facto de que, embora uma descontinuidade mais fina absorva um menor volume de calda, a pressão necessária para a injetar será inversamente proporcional.

4.3.3. Implementação do GIN

O GIN era originalmente um parâmetro simples, numérico, utilizado no decorrer de um programa de tratamento de um dado maciço. No entanto, com o passar dos anos, um conjunto de regras a serem seguidas referentes à injeção de caldas de cimento em maciços rochosos são com a presença de descontinuidades foram sendo desenvolvidas e implementadas (Lombardi, 2003). A esse conjunto de regras foi então conferido o nome de método GIN.

Os doze princípios correspondentes, que têm como objetivo a execução de um tratamento eficaz e de qualidade, e que ao mesmo tempo simplificam o processo de injeção e evitam a ocorrência de danos no maciço a tratar, encontram-se enunciados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Princípios base do método GIN (adaptado de Lombardi, 2003)

1	Definição exata da quantidade de trabalhos a realizar.
2	Dimensiona, mas não especifica o projeto de tratamento.
3	Definição da melhor calda possível para o projeto, do ponto de vista técnico, bem como do económico, através da execução de ensaios de laboratório.
4	Utilização de uma calda única, a melhor possível, para todos os trechos de injeção, de modo a garantir a qualidade dos resultados, bem como a simplificação do processo de injeção, diminuindo também a quantidade de calda desperdiçada.
5	Definição dos parâmetros da curva GIN: p máx, V máx e $GIN = p.V$, tendo sempre em consideração todas as características geológicas e geotécnicas da rocha, bem como a quantidade de trabalhos a realizar e a economia associada do projeto.
6	Confirmação dos parâmetros utilizados através da execução de ensaios de campo e verificação da eficácia das injeções através da execução de ensaios de injectabilidade adicionais.
7	Não realizar ensaios de absorção de água, pois estes são inúteis e perigosos.
8	Utilização do método <i>split spacing</i> para a execução da cortina de impermeabilização.
9	Aumentar o comprimento dos trechos de injeção em profundidade para acelerar o processo de injeção e adicionalmente obter alguma poupança de calda.
10	Em maciços muito permeáveis injetar água acima do NF, para o saturar, um pouco antes da execução das injeções, de modo a evitar a perda de água da calda para o maciço e criar obstruções nas fraturas.
11	A determinação da necessidade de execução de um furo adicional, bem como a sua profundidade é baseada na quantidade de calda injetada em furos adjacentes.
12	Execução dos procedimentos de injeção controlados por computador são um pré-requisito para a obtenção de um tratamento eficaz.

4.3.3.1. Controlo do processo de injeção

Todo o processo de injeção de furos através do método GIN é realizado e controlado em tempo real por computadores e outros equipamentos automatizados que registam os parâmetros de injeção mais importantes em cada trecho. Para além disso, estes equipamentos conseguem também traçar gráficos referentes a relações entre vários parâmetros:

- Pressão *versus* (vs) tempo;
- Caudal vs tempo;
- Absorção vs tempo;
- Pressão vs absorção;

- Penetrabilidade vs absorção:

A interpretação em tempo real destes gráficos permite a caracterização do processo de injeção e a detecção atempada da ocorrência de fenômenos de fracturação ou levantamento hidráulico, sendo assim possível a adaptação da injeção às características reais do maciço rochoso.

De todos os parâmetros possíveis de acompanhar, apenas dois necessitam de ser registados continuamente: a pressão de injeção no trecho e o caudal, a partir dos quais o volume de calda injetado pode ser obtido por integração (Lombardi e Deere, 1993).

Na figura 4.8 é possível observar dois dos gráficos obtidos a partir desses parâmetros.

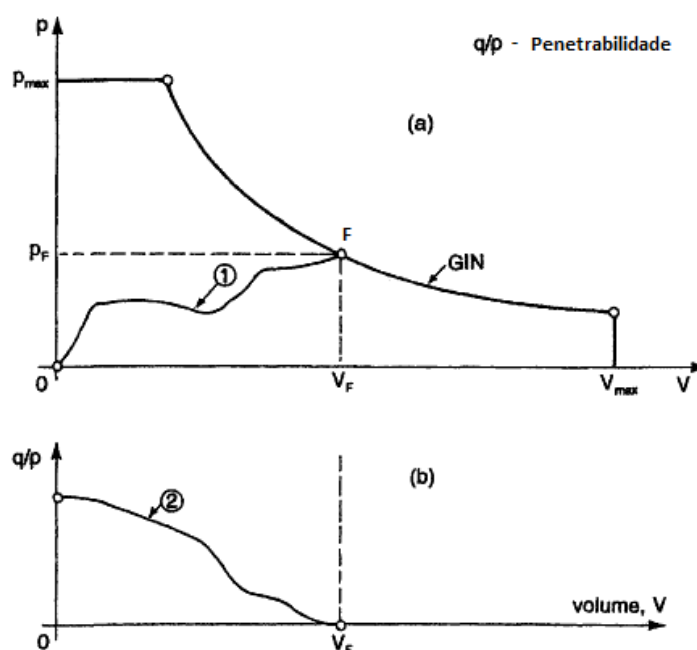


Figura 4.8 - Representação gráfica de (a) curva GIN e (b) curva de penetrabilidade correspondente (adaptado de Lombardi & Deere, 1993)

Na figura 4.8-(a), para além dos três limites escolhidos para um determinado projeto - a curva GIN, a pressão de injeção máxima ($P_{MÁX}$) e volume máximo de calda a injetar ($V_{MÁX}$), é possível observar a curva 1, que é uma representação gráfica dos valores de pressão usados e quantidade cumulativa de calda injetadas ao longo dum furo. O ponto F, que resulta da interseção da curva 1 com a curva GIN, representa os valores de pressão finais, P_F , e volume total de calda injetada, V_F , aquando de um caudal nulo, ou seja, o final da injeção.

Na figura 4.8-(b) encontra-se representada a curva de penetrabilidade da calda, que é uma ferramenta importante na monitorização do processo de injeção, uma vez que, ao longo do desenvolvimento desta curva observa-se uma redução na penetrabilidade, o que indica uma redução da eficácia do tratamento, que é o que é suposto acontecer com o desenrolar de todo o processo. A

importância desta curva se encontra então na capacidade de identificação de anomalias durante a injeção através da observação do pendor da curva de penetrabilidade.

4.3.3.2. Relação entre GIN e ensaios tipo Lugeon

Há quase um século que é costume recorrer ao uso de ensaios de absorção de água para avaliar a permeabilidade de um maciço rochoso, antes e depois de efetuado o seu tratamento por injeção de caldas. Desses ensaios de absorção, o ensaio tipo Lugeon é o mais conhecido e utilizado e, embora não forneça todas as informações desejadas, é um procedimento de ensaio simples e útil.

No entanto, segundo Lombardi (2003), existem algumas premissas demasiado simplistas relacionadas com este ensaio que, em conjunto com alguns hábitos antigos no que toca à execução das injeções, são suficientes para justificar algum ceticismo na sua fiabilidade.

Uma das interpretações possivelmente enganosas destes testes consiste na tentação de criar uma relação estática entre os valores Lugeon obtidos dos ensaios e o volume espectável de calda absorvida para cada trecho de injeção. Lombardi (*op. cit.*) realça ainda o facto que a velocidade de circulação da água é função do volume de calda, ignorando o facto que a água é um fluido newtoniano, enquanto que a calda de cimento é uma suspensão de grãos de um determinado tamanho que seguem, aproximadamente, as leis associadas a um fluido binghamiano.

Tendo como exemplo o caso de um maciço que apresenta uma frequência elevada de descontinuidades finas, os resultados obtidos de um ensaio tipo Lugeon podem ser idênticos aos de um maciço com apenas uma descontinuidade ampla. No entanto, neste último caso, a absorção de calda será muito elevada, enquanto que no primeiro, muito dificilmente existirá alguma absorção.

Muitas vezes, nestes exercícios teóricos de correlações estatísticas, as condições reais do processo de injeção são muitas vezes ignoradas. Lombardi (*op. cit.*) considera que, segundo a sua experiência, os ensaios de absorção de água podem, na melhor das hipóteses, dar uma indicação aproximada da redução de permeabilidade que é possível obter num determinado maciço após a execução dos tratamentos, sendo no entanto inúteis para definir a capacidade de absorção de calda por parte do mesmo, bem como incapazes de indicar sequer a injectabilidade deste. A injectabilidade poderá então apenas ser definida pela execução de ensaios de injeção de calda.

Deve ser realçado que estas críticas ao ensaio tipo Lugeon não são apenas efetuadas por Lombardi, tratando-se de um tema que polariza a comunidade geotécnica. Outras das críticas apontadas ao ensaio tipo Lugeon passam por considerar que este representa um sistemático desperdício de

dinheiro, sem qualquer benefício para o processo de injeção em si. Ainda mais, o ensaio pode ter efeitos nocivos devido à sua capacidade de reabrir descontinuidades previamente tratadas.

4.3.4. Comparação com os métodos convencionais

Enquanto que o método GIN usa apenas uma única calda estável e reduz a pressão máxima de injeção conforme o volume de calda injetado aumenta, os métodos convencionais recorrem à utilização de várias misturas de calda, mantendo uma pressão máxima de injeção constante.

No entanto estas metodologias não são tão diferentes como é possível pensar à partida. Ao considerar o conceito de pressão normalizada, que consiste na razão entre a pressão de injeção (p) e a coesão (c) da calda injetada ($P_n=p/c$), torna-se possível identificar semelhanças, como é possível observar na figura 4.9.

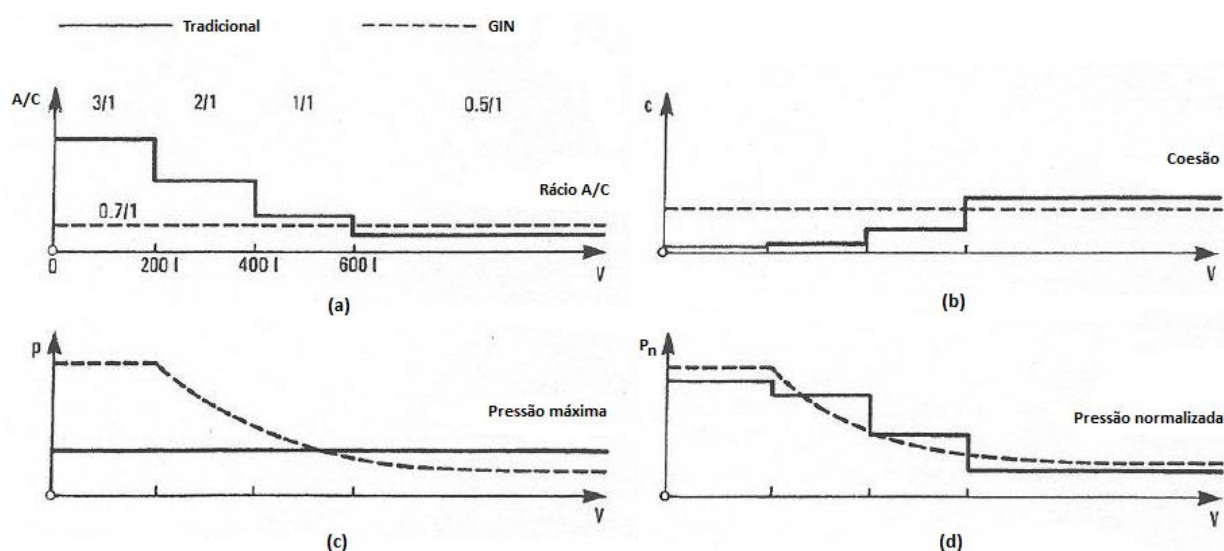


Figura 4.9 - Comparação dos métodos de injeção tradicional e GIN em termos de (a) relação A/C, (b) coesão, (c) pressão máxima e (d) pressão normalizada (adaptado de Lombardi, 1996)

Através da análise dos gráficos desta figura, é possível constatar que todos os métodos têm como objetivo evitar absorções elevadas de calda que são desnecessárias; apenas o caminho seguido é diferente.

Segundo os métodos convencionais, esta limitação da absorção é obtida através do aumento da coesão das caldas utilizadas, das mais finas para as mais espessas, em função do volume já injetado. Já no método GIN; a coesão é mantida constante, até porque só se utiliza uma única calda, reduzindo a pressão de injeção em função do volume já injetado.

Em ambos os casos, o resultado é uma diminuição da pressão normalizada, em patamares, nos métodos convencionais, ou progressivamente, no método GIN, sendo a diferença apenas na qualidade e previsibilidade dos resultados obtidos. Para além disso, o método GIN permite a utilização de pressões e volumes mais elevados sem qualquer risco.

4.3.5. Vantagens do método

As principais vantagens do método GIN são (Lombardi, 1996; 2003; 2007):

- A simplificação de processos ao utilizar apenas uma mistura de calda, eliminando assim, ou pelo menos reduzindo, o desperdício de outras misturas não utilizadas;
- Redução ou mesmo eliminação do risco de ocorrência de fenómenos de fracturação e levantamento hidráulico através da remoção da combinação de pressões e volumes de injeção elevados;
- Distância de penetração aproximadamente constante ao longo de todos os trechos independentemente da qualidade do maciço, tornado todo o processo mais previsível;
- Obtenção de um conjunto de dados coerentes, que permitem a análise do progresso das injeções, bem como dos resultados obtidos e como os otimizar;
- Ser um método que se corrige e adapta por si próprio às condições encontradas, que compensa uma grande parte da heterogeneidade encontrada nas características dos maciços.

Segundo Lombardi (2007), o principal mérito do método GIN consiste no facto de ter demonstrado que o alcance, ou distância de penetração de uma determinada calda, no final do tratamento, quando o caudal de injeção é nulo, depende apenas da coesão desta e não da sua viscosidade.

Esta última propriedade influencia a duração da injeção, e portanto, de modo a diminuir essa duração, pressões mais elevadas podem, e devem, ser utilizadas durante o tratamento.

É possível então dizer que o método GIN, para além de tornar o resultado final de uma injeção independente da viscosidade da calda utilizada, também o torna, na maior parte, independente dos valores de pressão utilizados, sendo apenas necessário considerar os valores referentes ao final da injeção.

A tabela 4.2 sintetiza alguns dos erros mais comuns cometidos por utilizadores inexperientes deste método, que para além de poderem anular qualquer vantagem da sua aplicação, também poderão colocar em causa a eficácia do próprio tratamento.

Tabela 4.2 - Principais erros a serem evitados no método GIN (adaptado de Lombardi 2003)

	Erro	Motivo
1	Tomar decisões em relação ao projeto apenas para cumprir com tradições antigas	Não são tomadas em consideração as necessidades reais do projeto
2	Definir o GIN no início do projeto, não efetuando a sua confirmação através da execução de ensaios de injectabilidade	GIN não adequado às condições hidromecânicas reais do terreno, podendo gerar-se hidrofracturação ou a calda não atingir a penetração necessária
3	Definir a distância entre furos, não efetuando a sua confirmação através da execução de ensaios de injectabilidade	O método tradicional de “split-spacing” embora conforme, poderá não definir as distâncias mais indicadas
4	Mudar para um segundo tipo de calda mais espessa apenas para obedecer formalmente a algumas especificações em termos de pressões de injeção	O objetivo do tratamento é injetar um determinado volume de calda e atingir uma certa penetração, não atingir uma determinada pressão
5	Definir um número de trechos específico ao longo de todo o furo	Os requisitos de permeabilidade diminuem com a profundidade, logo o número de trechos deve diminuir de acordo
6	Fixar um comprimento de trecho específico	Os requisitos do tratamento podem não ser constantes em profundidade, podendo ser necessárias alterações
7	Acreditar na existência de uma relação entre os resultados dos ensaios de permeabilidade e a injectabilidade do maciço	Execução de ensaios desnecessários, aumentando o custo dos trabalhos
8	Continuar a injetar calda após a ocorrência de fracturação hidráulica ou o GIN ter sido atingido	Desperdício de calda, aumentando o custo dos trabalhos
9	Definir no início dos trabalhos o comprimento dos furos a realizar, mantendo-os ao longo de toda a obra	Não são levadas em conta as condições hidromecânicas do terreno e as possíveis alterações ao traçado que essas acarretam
10	Analisar os dados obtidos durante a injeção apenas após esta ter sido terminada	A informação recolhida em tempo real deve ser utilizada para guiar o processo de injeção, e portando deve ser analisada durante o mesmo
11	Alterar constantemente o GIN	Atinge-se um ponto em que não é possível compreender que tratamento foi realmente efetuado, devido à impossibilidade de compreensão dos dados recolhidos

4.4. MÉTODO DE WILSON E DREESE (1998)

Wilson e Dreese (1998) descreveram um processo de dimensionamento que incluía análises dos efeitos das várias configurações possíveis de cortinas de impermeabilização no respetivo desempenho e custos. Mais recentemente, Wilson e Dreese (2003) refinaram este processo, formalizando-o no conceito de cortinas de impermeabilização quantificadas (*Quantitatively Engineered Grout Curtain*, QEGC) o qual acreditam ser um avanço em relação à metodologia proposta por Houlsby (1977). O seu conceito implica que todos os elementos de projeto sejam baseados numa análise quantitativa e em diversas considerações, incluindo:

- Implicações na segurança da barragem;
- O valor da água perdida por percolação (através de uma análise custo/benefício);
- A aceitação pública e política da percolação de águas residuais.

Wilson e Dreese (1998) afirmaram que o método QEGC podia ser integrado nos procedimentos de construção de qualquer obra de modo a assegurar que a quantidade certa de calda é injetada para garantir um desempenho satisfatório da cortina de impermeabilização.

Os pré-requisitos para a aplicação efetiva deste conceito são extensos, incluindo (Wilson e Deere, 2003):

a) Prospeção geotécnica e ensaios de absorção de água em quantidade suficiente de modo a determinar, minuciosamente, a sequência litológica, estrutura e características do sistema de fraturas e condutividade hidráulica do maciço e o grau de meteorização. Os resultados obtidos através destes ensaios deverão ser sempre os mesmos, independentemente da metodologia escolhida:

- Perfis geológicos, geotécnicos e hidráulicos;
- Orientações de famílias de descontinuidades e outras características físicas e mecânicas;
- Valor de condutividade hidráulica para cada unidade geotécnica, baseada em ensaios realizados segundo as orientações mais adversas;
- Diagramas de comportamento de descontinuidades, realizados a partir de ensaios de absorção com patamares de pressão ascendentes e descendentes;

b) Incluir os seguintes aspetos no relatório de projeto (*op.cit.*):

- Identificação de zonas com potencial para servirem de base “impermeável” da cortina;
- Determinação das orientações mais vantajosas para os furos de injeção;
- Identificação de zonas críticas ou que necessitem de cuidados especiais;

- Seleção de condutividades hidráulicas para o dimensionamento;
 - Determinação preliminar de pressões de injeção máximas.
- c) Análise detalhada da rede de percolação existente no maciço, nomeadamente:
- A quantidade de água percolada e a sua pressão, de modo a averiguar a necessidade de tratamento;
 - Determinar a intensidade de injeção necessária;
 - Avaliar locais e configurações alternativas para a cortina.
- d) Uma análise custo/benefício de modo a comparar o custo do tratamento ao valor da água perdida por percolação;
- e) Uso dos melhores procedimentos de execução em todos os aspetos da operação de injeção;
- f) Execução de ensaios de absorção de água em cada trecho de cada furo durante o programa de injeções para garantir que os requisitos de projeto foram atingidos;
- g) Ferramentas analíticas e de monitorização com exatidão, velocidade e utilidade suficientes que promovam uma compreensão e controlo dos resultados do processo de injeção conforme a informação é obtida.

Wilson e Dreese (1998) constataram que, para a realização de uma apreciação preliminar da necessidade de injeção ou das velocidades de percolação na fase de anteprojeto, a análise da percolação pode ser feita, quer pela aplicação da lei de Darcy, quer pela construção de redes de percolação simples. O recurso ao uso de modelação por computador e à análise de métodos de elementos finitos também é apropriado nas fases preliminares e finais do dimensionamento, onde estes procedimentos detalhados de análise podem ser utilizados para determinar a necessidade de execução de fiadas múltiplas ou se uma única é suficiente para o tratamento do maciço.

Alguns dos objetivos da utilização destes métodos passam por (*op.cit.*):

- Avaliar os efeitos de possíveis mudanças de localização das cortinas no que toca à sua facilidade de construção e eficácia;
- Avaliar os efeitos da configuração definida para uma determinada cortina nos seus custos de execução;
- Selecionar a localização e profundidade final da cortina;
- Finalizar a seleção de variáveis, como a orientação dos furos, o seu espaçamento inicial, a sua profundidade e a técnica de injeção utilizada.

Wilson e Dreese (1998) concluíram finalmente que, em circunstâncias ideais, o projeto deveria incluir a hipótese que permeabilidades na ordem de 3 a 8 Lu conseguiriam ser atingidas através da

execução de uma cortina de impermeabilização de fiada única, e que, nas melhores circunstâncias possíveis, permeabilidades de 0.1 Lu seriam possíveis construindo uma cortina de fiada tripla. No entanto, é de realçar que, na maioria das empreitadas, não são utilizadas as tecnologias mais avançadas, e como tal a execução de cortinas de fiada única resultaria na obtenção de permeabilidades de 80 Lu, sendo que no caso de cortinas de fiada tripla essa permeabilidade seria reduzida para 8 Lu, sendo este um valor muito mais próximo de outros valores obtidos por diferentes metodologias.

Mais recentemente, Wilson e Dreese em conjunto com Bruce, abordaram novamente esta metodologia, atualizando-a, visto que muitos dos aspetos relacionados com a construção das cortinas tinham sofrido avanços significativos desde a génese do método no final do século passado. De seguida listam-se as atualizações mais importantes efetuadas (Bruce *et al.*, 2009):

- i. Embora se mantenha a utilização da técnica de *split spacing* para a execução da cortina, são agora realizadas duas fiadas, com os respetivos furos inclinados em direções opostas, como é possível observar na figura 4.10.
- ii. São utilizadas caldas à base de cimento estáveis com aditivos e adjuvantes que lhes permitem obter as propriedades reológicas desejadas, sendo a utilização de caldas à base de cimento puras com relações A/C elevadas e quantidades nominais de bentonite ou outro superplastificante não mais aceitável;
- iii. O controlo de qualidade do tratamento é efetuado atualmente por equipamentos de monitorização automática devido às vantagens que a utilização destes acarreta (seção 3.3.2.2.);

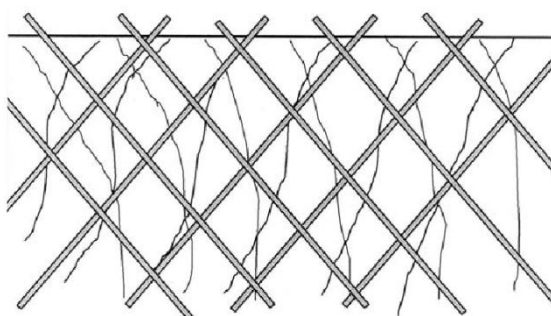


Figura 4.10 - Orientação proposta para os furos de injeção segundo a metodologia de QEGC (adaptado de Warner, 2004)

5. CASO DE ESTUDO – APLICAÇÃO DO MÉTODO GIN AO TRATAMENTO DA BARRAGEM DA APARTADURA

5.1. BARRAGEM DA APARTADURA

5.1.1. Caracterização geral

A barragem da Apartadura é uma barragem de enrocamento de perfil zonado com uma cortina de betão betuminoso e uma galeria de injeção e drenagem no pé de montante da barragem, como é possível observar na figura 5.1, encontrando-se integrada no “Aproveitamento Hidroagrícola de Marvão”. O projeto de execução teve início em 1983 tendo a sua construção decorrido entre 1989 e 1992.

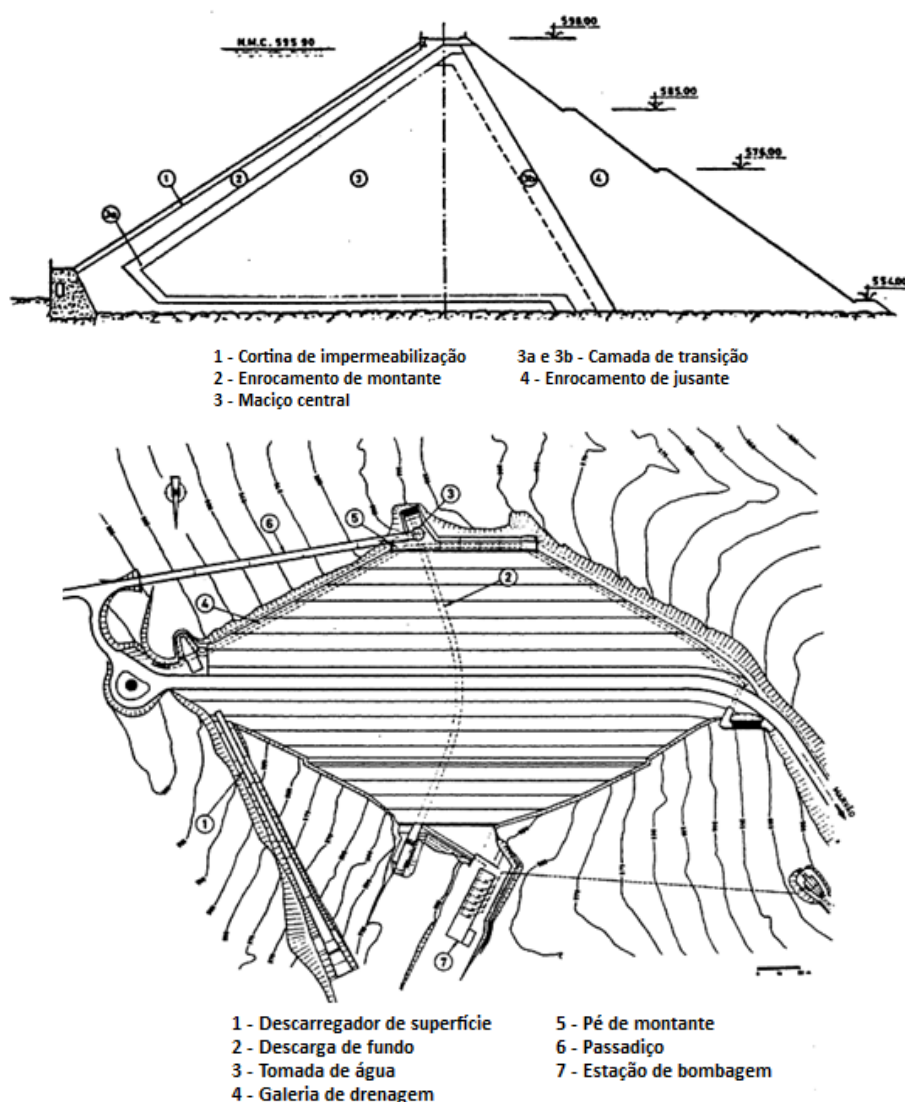


Figura 5.1 - Planta e perfil transversal da barragem da Apartadura (adaptado de Silva Gomes *et al.*, 1995)

Construída sobre a ribeira das Reveladas, perto do local da Apartadura no concelho de Marvão, encontra-se a cerca de 8 km de Portalegre (figura 5.2) e tem como objetivos:

- O abastecimento de água dos concelhos de Marvão, Castelo de Vide e Portalegre;
- Permitir a rega de uma área de aproximadamente 720 ha para fins agrícolas.



Figura 5.2 - Localização geográfica da barragem da Apartadura (Google Earth, 2012)

Como é possível observar na figura 5.1, o corpo da barragem da Apartadura é constituído por quatro zonas principais (Gonzales e Rodrigues, 1988):

- i. **Zona 1 – Paramento impermeável de montante** - inclui a membrana betuminosa, bem como a camada de transição de material granular, com uma espessura total de 1 m.
- ii. **Zona 2 – Enrocamento selecionado de montante** - consiste no conjunto de materiais não uniformes e bem graduados com a dimensão máxima de 25 cm e uma dimensão mínima correspondente à areia fina, compactadas com uma densidade relativa (D_R) não inferior a 95%. Atua como uma zona semi-impermeável, permitindo algum controlo sobre eventuais zonas de percolação através da membrana betuminosa.
- iii. **Zona 3 – Zona central de enrocamento** - representa 60% do volume total dos materiais constituintes da barragem e consiste, tal como a zona 2, no conjunto de materiais não uniformes e bem graduados, mas com dimensões maiores. A dimensão máxima é de 60 cm, enquanto que a dimensão mínima corresponde a areias grossas, compactadas com D_R não inferior a 85%. Nesta zona foi admitida a inclusão de materiais alterados e/ou decompostos em pequenas quantidades, colocados preferencialmente na zona de jusante da barragem.
- iv. **Zona 4 – Enrocamento de jusante** - desta zona fazem parte os materiais não uniformes, bem graduados, com uma dimensão máxima de 100 cm e mínima correspondente a areias

grossas, compactadas com D_R não inferior a 75%. Sendo a zona mais a jusante, as especificações aplicadas aos materiais utilizados foram menos restritivas, aceitando-se a inclusão de materiais alterados e/ou decompostos, distribuídos o mais uniformemente possível ao longo de toda a zona. Este material pode ser parcialmente obtido a partir dos materiais de escavação das estruturas de betão edificadas.

Para além destas zonas, consideram-se ainda parte da barragem os seguintes órgãos de segurança e de exploração (figura 5.1):

- O descarregador de superfície, em forma de bico de pato, perto do encontro direito da barragem;
- A descarga de fundo, que atua também como a conduta de tomada de água;
- A torre de tomada de água, localizada junto à margem direita;
- A estação de bombagem, situada imediatamente a jusante da barragem.

5.1.2. Delimitação da área em estudo

Embora a barragem da Apartadura apresente um comprimento de coroamento de aproximadamente 290 m, a área em estudo neste documento será limitada à zona de fundo do vale, como é possível observar na figura 5.3. Essa zona foi delimitada pelos perfis de projeto P18 e P24 e perfaz cerca de 60 m de extensão.

Esta decisão não foi tomada exclusivamente por razões organizacionais nomeadamente limitações de tempo, da quantidade e qualidade de informação disponível e possibilidade de acesso à mesma, mas também por aspetos geotécnicos.

A zona de fundo do vale é coincidente com a zona central da obra, onde teoricamente as cargas hidráulicas são mais elevadas e, portanto, onde a eficácia da cortina de impermeabilização construída mais será posta em causa. Para além disso, as zonas de fundo de vale apresentam geralmente características geotécnicas mais fracas e estão geralmente associadas a acidentes geológicos, o que nem sempre acontece nas encostas, assumindo maior relevância o seu estudo detalhado.

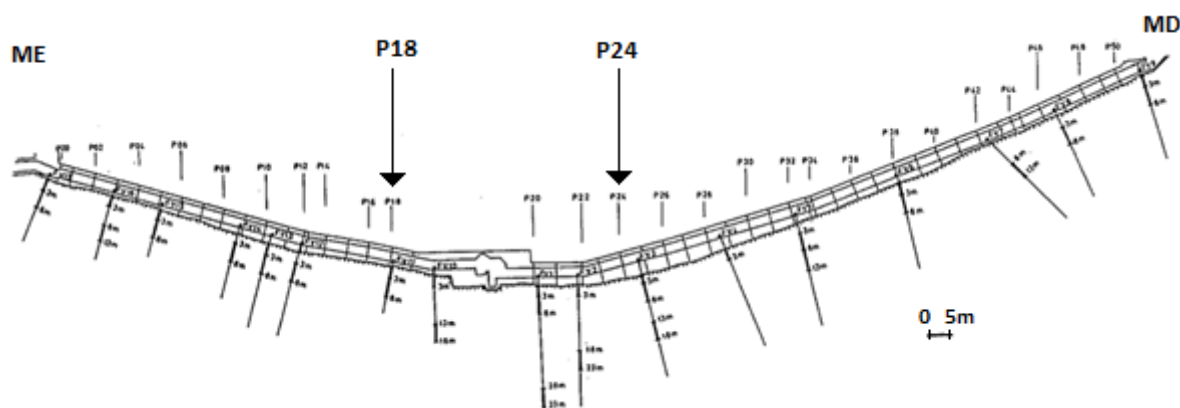


Figura 5.3 - Extrato do perfil geológico pelo eixo da barragem para a área em estudo (adaptado de Ramos, 1995)

5.2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

5.2.1. Geologia

Em termos regionais, o local de implantação da barragem da Apartadura e respetivos órgãos de exploração insere-se em terrenos constituintes da Zona Centro Ibérica. Localmente, a obra encontra-se fundada no flanco SW do sinclinal de Marvão, cujo eixo apresenta uma direção NW-NE (Perdigão *et al.*, 1973)

No geral, as unidades litoestratigráficas presentes são constituídas por arenitos e quartzitos com lenticulas xistentas intercaladas, sendo na sua maioria datadas do Silúrico Superior (Perdigão, 1972).

5.2.2. Geomorfologia

A área em referência consiste num vale ligeiramente assimétrico com encostas suaves, sendo a margem esquerda mais inclinada do que a direita. O curso de água presente, a Ribeira das Reveladas, escavou o seu leito em xistos, predominantemente argilosos e grafitosos, e quartzitos, seguindo usualmente a direção geral da estratificação presente (NW-SE).

Em termos gerais, as variações de direção do curso de água existentes, quer a montante quer a jusante da barragem, são consequência da existência de linhas de fratura extensas, identificadas no decorrer dos estudos geofísicos efetuados no âmbito da construção da barragem (Ramos, 1995).

5.2.3. Tectónica e neotectónica

Sobre os terrenos mais antigos do soco da região envolvente, assentam em discordância os depósitos da zona da barragem (Perdigão, 1972). Estes terrenos terão todos sido afetados por movimentos hercínios que os dobraram e fraturaram tendo dado origem a fracturação regional caracterizada adiante na zona do eixo da barragem. Sofreram erosão intensa, que culminaram no traçado dos cursos de água atuais, nomeadamente a Ribeira das Reveladas.

Do ponto de vista neotectónico, a falha ativa mais próxima é a falha do Ponsul (Cabral 1995). Esta falha é um importante acidente tectónico do Maciço Hespérico, atingindo uma extensão de 120 km, 85 dos quais em território português, e corresponde a um desligamento esquerdo tardivarisco, reativado na Orogenia Alpina, apresentando uma orientação geral N60ºE.

A reativação pós-paleozóica da falha é evidenciada por dados geomorfológicos, estratigráficos e estruturais. A movimentação é identificada em contactos por falha, com o soco a norte, a cavalgar os depósitos cenozóicos a sul. Em alguns locais foram encontradas evidências de uma provável reativação no Quaternário, principalmente de falha inversa, com um movimento vertical acumulado de aproximadamente 100 m (*op. cit.*).

5.2.4. Sismicidade

O território continental português, no contexto da tectónica de placas, encontra-se situado na placa Euroasiática, limitada a sul pela falha Açores-Gibraltar, que funciona como uma fronteira entre as placas Euroasiática e Africana, e a oeste pela dorsal do Oceano atlântico. A localização da barragem em estudo encontra-se ainda limitada a norte pela falha do Ponsul.

A sismicidade instrumental identificada na figura 5.4 demonstra que Portugal continental é afetado por duas grandes zonas de atividade sísmica:

- Zona interplacas, cujos sismos têm geralmente como epicentro o Banco de Gorringe, responsável pelos maiores sismos históricos que atingiram Portugal continental;
- Zona intraplacas, caracterizada por uma sismicidade baixa a moderada e mais difusa, sendo mais difícil relacionar os epicentros dos sismos com as falhas existentes.

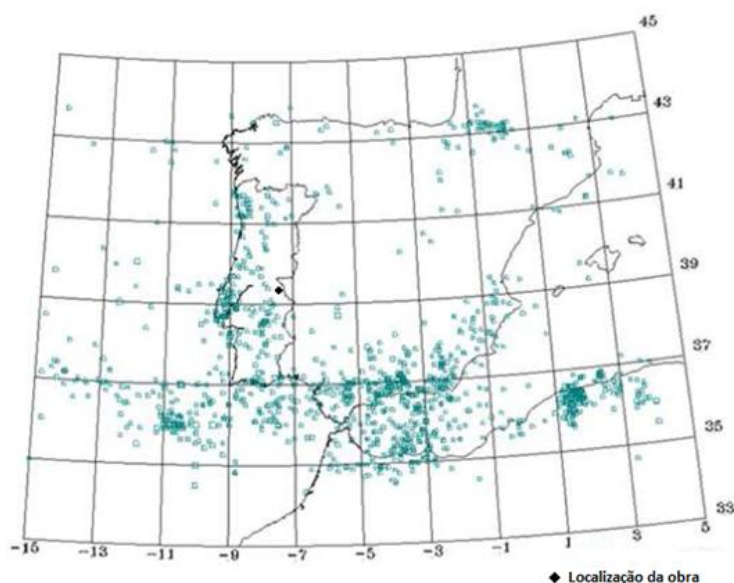


Figura 5.4 - Sismicidade instrumental em Portugal até 1995 (adaptado de SPES, 2010)

De acordo com os dados recolhidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, referentes aos sismos históricos e instrumentais que ocorreram em Portugal, apresentados na figura 5.5 sob a forma da carta de isossistas máximas registadas, é possível observar que a barragem da Apartadura situa-se numa zona de intensidade macrossísmica de grau VII segundo a escala de Mercalli modificada.

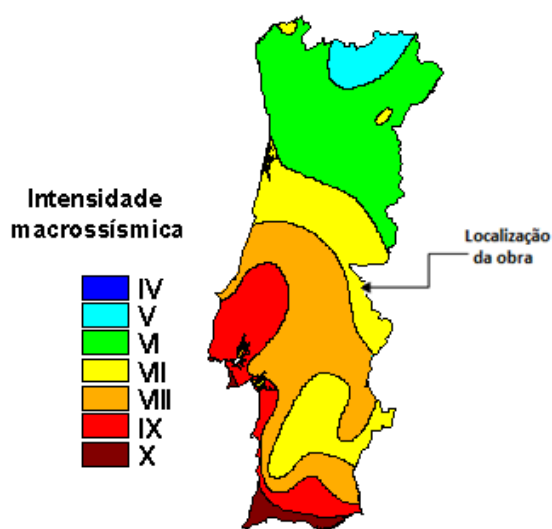


Figura 5.5 - Carta de isossistas máximas observadas em Portugal continental (adaptado de LNEC, 2005)

Para efeitos da execução de um zonamento sísmico segundo o Eurocódigo 8 (IPQ, 2010), a barragem da Apartadura situa-se na zona sísmica 1,5 para ações sísmicas do tipo 1 (sismicidade interplacas/afastada) e na zona sísmica 2,4 para ações sísmicas do tipo 2 (sismicidade intraplacas/próxima), como se encontra ilustrado na figura 5.6.

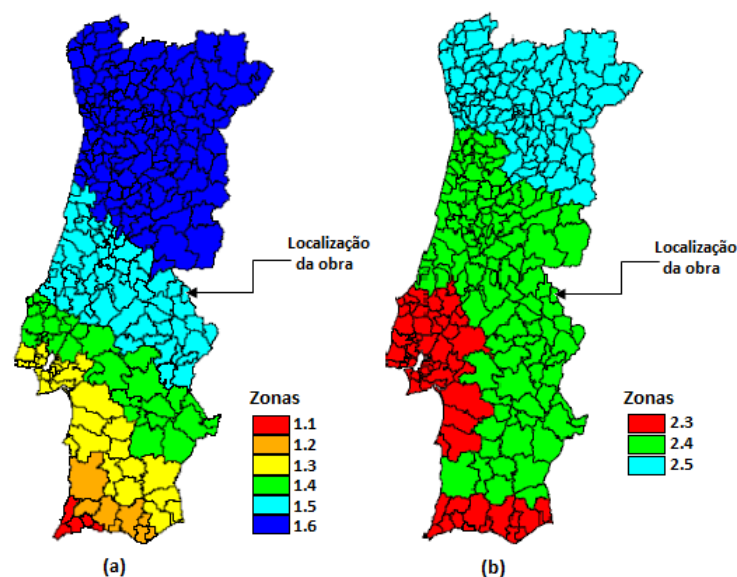


Figura 5.6 - Zonamento sísmico de (a) sismicidade afastada e (b) sismicidade próxima de Portugal continental (adaptado de IPQ, 2010)

Em termos da natureza do terreno de fundação, a NP EN 1998-1 considera a existência de cinco tipos mais dois que requerem estudos específicos de definição da ação sísmica (IPQ, 2010). O maciço de fundação da barragem em estudo é considerado do tipo A – “Rocha ou outro tipo de formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 m de material mais fraco à superfície”.

5.3. ZONAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

5.3.1. Global

O zonamento geotécnico da obra em estudo foi obtido através da execução de vários trabalhos de prospeção com o intuito de caracterizar o maciço de fundação. Esses trabalhos decorreram ao longo de várias fases:

- Prospeção geofísica, através de perfis de resistividade e sondagens geoeléctricas (Sousa, 1980 *in* Ramos, 1995);
- Levantamento geológico de superfície à escala 1/500;
- Observação direta do subsolo, através da execução de duas valas, V1, na margem esquerda e V2, na margem direita; de 52 e 115 m de comprimento respetivamente, segundo o eixo previsto para a barragem;
- Prospeção mecânica realizada com sondagens à rotação carotadas, sendo acompanhadas pela execução de ensaios de absorção de água do tipo Lugeon (Tecnasol, 1981 *in* Ramos, 1995))

As duas valas realizadas permitiram recolher informações sobre as várias famílias de descontinuidades existentes, identificadas nas tabelas 5.1 e 5.2. Com este conhecimento foi possível definir a orientação mais apropriada para os furos de sondagens executados posteriormente, bem como para os furos de injeção das várias fiadas constituintes da cortina de impermeabilização. Para além disso, a inspeção visual das duas valas permitiu concluir que a meteorização atingiu mais profundamente as formações da margem direita do que as da esquerda (Ramos, 1995).

Tabela 5.1 - Resumo das atitudes da fracturação existente no maciço (adaptado de Ramos, 1995)

Famílias	Direção	Inclinação	Frequência
A	N (55°-86°) E	70° SE -90°	73%
B	N (21°-37°) E	20° ESSE	9%
C	N (69°-86°) E	(20°-26°) NW	9%
D	N (30°-35°) E	(60°-65°) ESE	9%

Tabela 5.2 - Resumo das atitudes da estratificação existente no maciço (adaptado de Ramos, 1995)

Famílias	Direção	Inclinação
1	N-S a N25°W	30° WSW a 90°
2	N9°W a N25°W	(42° -74°) ENE

Em termos da prospeção mecânica, foram realizados sete furos de sondagem carotadas ao longo do eixo previsto para a barragem, como é possível observar na figura 5.7. No entanto, tendo em conta a área em estudo neste documento, apenas as sondagens 3 e 4, ou 7E0 e 1E2 respetivamente, irão ser consideradas. Na tabela 5.3 encontra-se resumida a informação obtida por essas mesmas sondagens.

Tabela 5.3 - Características das duas sondagens realizadas no fundo do vale (adaptado de Ramos, 1995)

Sondagem	Localização	Comprimento (m)	Nº de ensaios tipo Lugeon	"Defeitos estruturais" identificados	Profundidades (m)
7E0	Fundo do vale	30	5	Falha	14 - 15,7
1E2	Margem direita	35	6	Falha	5,84 - 6,10
				Zona de esmagamento	29,09 - 29,18

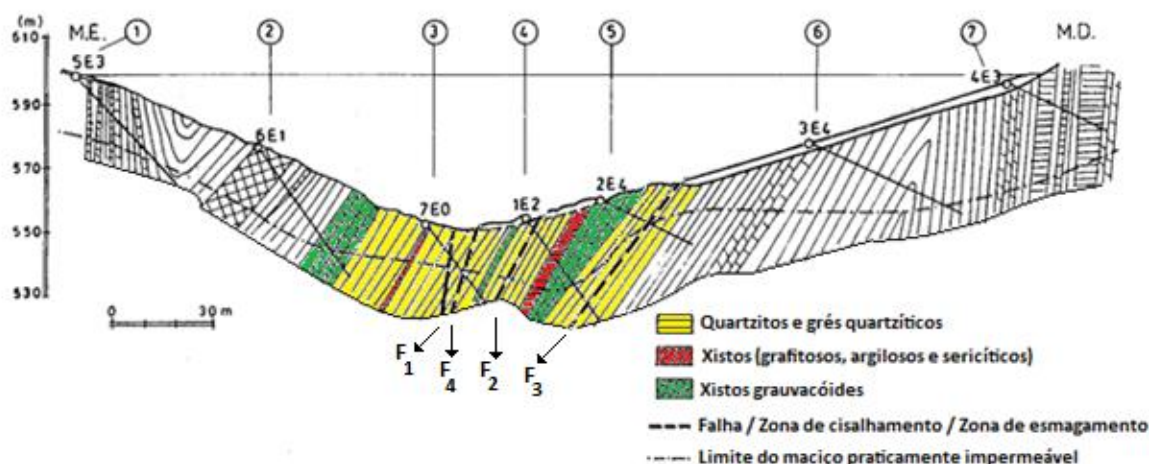


Figura 5.7 - Corte geológico-geotécnico segundo o eixo da barragem (adaptado de Silva Gomes, 1995)

Na figura 5.7 encontram-se também assinaladas várias falhas, denominadas de F_1 , F_2 , F_3 e F_4 . Estas falhas foram identificadas através da nova análise dos tarolos obtidos nas sondagens efetuadas.

De acordo com os dados obtidos através dos estudos realizados, foi possível a identificação de três zonas distintas, cujas características se encontram resumidas na tabela 5.4. É de realçar que os dados referentes às profundidades das respetivas zonas geotécnicas dizem respeito apenas à zona do fundo do vale, pois esta é a única zona em referência na presente investigação.

Tabela 5.4 - Resumo das características das zonas geotécnicas definidas para o fundo do vale

Zonas geotécnicas	Estado de meteorização	Grau de fracturação	Absorções (Lu)	Profundidades médias (m)
ZG3	W4 -5	F4	> 30	2 - 3
ZG2	W4	F4	5-30*	4 - 10
ZG1	W1-2	F2, F3	< 5	> 10

*Um trecho nesta zona atingiu 70 Lu.

5.3.2. Hidráulico

Como já foi enunciado anteriormente, aquando da execução das sondagens carotadas foram também efetuados ensaios de tipo Lugeon nessas sondagens de modo a realizar um zonamento hidráulico do maciço. Esse zonamento hidráulico permitiu definir os limites de permeabilidade admissíveis para a cortina de impermeabilização e, conseqüentemente, a sua profundidade. Na tabela 5.5 encontram-se identificados os vários patamares de pressão que foram selecionados para

aqueles ensaios. Em termos gerais, os valores Lu obtidos decresceram significativamente com o aumento da profundidade (Silva Gomes, 1993).

Tabela 5.5 - Pressões utilizadas no decorrer dos ensaios tipo Lugeon (adaptado de Carvalho, 1992)

Profundidade (m)	Patamares de pressão (kPa)
< 3	100 - 200 - 100
3 - 8	200 - 400 - 200
8 - 18	250 - 500 - 250
18 - 28	350 - 700 - 350
> 28	500 - 1000 - 500

Após a análise dos resultados dos ensaios tipo Lugeon, em conjunto com as restantes informações recolhidas, foi definido que a cortina a realizar seria constituída por três fiadas, e que as cortinas exteriores (F-3 e F-1) deveriam atingir profundidades tais que as permeabilidades admissíveis não ultrapassassem os 4 Lu. A fiada central (F-2) por sua vez deveria atingir uma profundidade tal de modo que as absorções registadas não ultrapassassem os 2 Lu.

5.4. EXECUÇÃO DA CORTINA DE IMPERMEABILIZAÇÃO

Após terem sido analisadas as condições geológico-geotécnicas do maciço de fundação da barragem, e definido o número de fiadas constituintes da cortina, foi necessário determinar a orientação dos furos de injeção a realizar.

Era imperativo que os furos intersectassem os planos de xistosidade existentes no maciço o mais perpendicularmente possível, pois estes são provavelmente responsáveis pela orientação do fluxo de água que circula de montante para jusante.

As orientações definidas foram de N15°W para os furos na margem esquerda e de N15°E para os da margem direita, enquanto que as inclinações foram de 75°, 70° e 65° para as fiadas F-1, F-2 e F-3 respetivamente (Ramos, 1995), como é possível observar na figura 5.8.

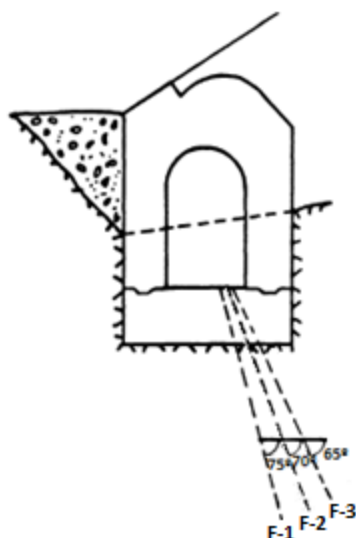


Figura 5.8 - Disposição e orientação das cortinas de impermeabilização F-1, F-2 e F-3 (adaptado de Silva Gomes, 1993)

A execução da cortina teve início com a fiada de jusante (F-3), seguida da fiada de montante (F-1) e finalmente da fiada central (F-2); segundo as especificações de projeto, estas fiadas seriam realizadas recorrendo ao método *split spacing*.

No entanto, devido ao facto da cortina ter sido executada após a barragem já se encontrar construída, foi necessário trabalhar a partir da galeria de drenagem localizada no pé de montante da barragem, o que significa que o espaço de manobra dos equipamentos necessários para realizar uma furação segundo o método *split spacing* era muito reduzido, o que impossibilitou tal objetivo.

O método adotado para a execução da cortina foi então uma aproximação do *split spacing*, seguindo as suas diretrizes sempre que possível, e adaptando-as às condições presentes quando necessário. O resultado foi uma cortina de impermeabilização onde nem sempre o espaçamento entre furos de diferentes ordens foi constante e a ordem de execução destes foi um pouco aleatória, dependendo, como já tinha mencionado anteriormente, das condições detetadas.

É de realçar que estas alterações às especificações iniciais de projeto não comprometeram a eficácia da cortina de qualquer modo.

5.4.1. Metodologia geral de injeção aplicada

Para a execução dos furos de injeção foi adotado o método de Houlsby, descrito no capítulo 4; os furos seriam injetados inicialmente com uma calda pouco espessa (A/C de 3/1), sendo progressivamente espessada caso não fosse verificada uma subida de pressão (3/1 → 2/1 → 1/1 → 1/2). Caso fosse necessário a utilização da calda mais espessa (1/2) considerava-se que a “nega”

correspondia a uma absorção menor ou igual a 50 l por trecho de 5 m à pressão máxima durante 10 min.

Todas as injeções foram realizadas pelo método descendente sem obturador nos dois primeiros trechos (0-8 m), alterando-se para o método ascendente com obturador para os restantes trechos. Na figura 5.9 encontra-se representado um fluxograma da metodologia adotada para a grande maioria dos furos.

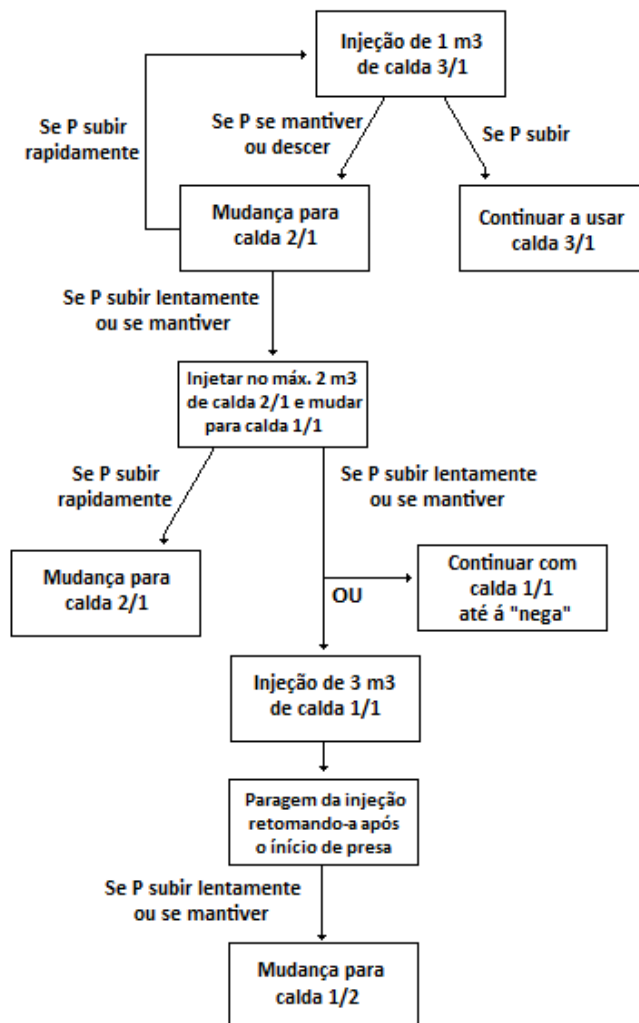


Figura 5.9 - Fluxograma adotado para a metodologia de injeção

A fiada F-3 é uma exceção à utilização generalizada da metodologia enunciada anteriormente. Devido ao facto de ter sido a primeira fiada a ser efetuada e da fracturação principal da zona ser sub-vertical, foi utilizada uma metodologia ligeiramente diferente nos três primeiros trechos (0-13 m):

- Utilização inicial de uma calda mais espessa (1/1);
- Diminuição da pressão de injeção em relação aos outros trechos;
- Injeção descendente com obturador nestes trechos.

Esta alteração teve como objetivo injetar as descontinuidades mais abertas na zona superficial do maciço durante o período de injeção descendente, criando assim uma barreira que impedisse a ascensão da calda menos espessa que seria utilizada inferiormente. Tudo isto com o objetivo de diminuir a probabilidade de ocorrência de fenómenos de fuga de calda para a superfície, contaminando assim o material integrante do enrocamento.

5.4.2. Pressões de injeção

As pressões de injeção adotadas para a execução das injeções foram baseadas nos resultados dos ensaios tipo Lugeon, e encontram-se representadas na tabela 5.6 como “Valores iniciais”. No entanto, no decorrer das injeções foram verificadas ocorrências de fracturação hidráulica em profundidades superiores a 18 m, o que levou à redução da pressão utilizada a partir dessa profundidade - “Valores finais”, tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Pressões de injeção da calda (adaptado de Carvalho, 1992)

Profundidades (m)	Pressões máximas de injeção (kPa)	
	Valores iniciais	Valores finais
0 - 3	200	200
3 - 8	400	400
8 - 13	600	600
13 - 18	1000	1000
> 18	1500	

Como foi mencionado anteriormente, foi utilizada uma metodologia diferente para a execução da fiada F-3, sendo parte dessa metodologia a utilização de pressões mais reduzidas, aproximadamente 2/3 das pressões utilizadas pelo método geral como é possível observar na tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Pressões de injeção de calda para a fiada F-3

Profundidade (m)	Pressões máximas de injeção (kPa)
0 - 3	150
3 - 8	300
8 - 13	450

5.5. APLICAÇÃO DO MÉTODO GIN

5.5.1. Considerações adotadas

No âmbito da presente dissertação, investigou-se a aplicação do método GIN, pouco utilizado ainda em Portugal como alternativa ao método de Houlsby, na cortina de impermeabilização da barragem da Apartadura na zona do fundo do vale.

Para tal aplicação foram disponibilizados pelo LNEC os dados referentes à execução das injeções de impermeabilização, sendo utilizados também dados provenientes das dissertações de Carvalho (1992) e Ramos (1995), de modo a validar e complementar algumas das informações obtidas.

Para o efeito, foi necessário considerar um conjunto de premissas de modo a viabilizar a reutilização dos dados disponíveis, obtidos durante a execução da cortina segundo o método de Houlsby, nomeadamente no que respeita a utilização de diversos tipos de calda e critérios de ‘nega’ variáveis em função da profundidade.

A tabela 5.8 sintetiza as considerações de base que tiveram de ser implementadas para viabilizar a análise.

Tabela 5.8 - Resumo das adaptações implementadas para aplicar o método GIN à cortina de impermeabilização

Premissa adotada	Justificação
Furos cujas posições eram desconhecidas não foram considerados no âmbito da análise	Sem conhecer a posição e orientação de um determinado furo não é possível recolher qualquer informação válida deste
Dados referentes a profundidades superiores a 28 m não foram considerados no âmbito da análise	Como nem todos os furos atingem a mesma profundidade, foi estabelecida uma profundidade limite para a análise dos dados, permitindo assim uma melhor comparação de valores entre os vários furos
Dados provenientes de determinados furos são considerados em ambas as margens	Embora seja utilizada a terminologia de "Margem direita" e "Margem esquerda", todos os furos se encontram no fundo do vale e, em alguns casos, estes não se encontram suficientemente posicionados num determinado lado do talvegue que torne possível a escolha de margens
Em trechos injetados com mais do que uma calda, foi assumida uma única calda	Para proceder de acordo com o método GIN, foi efetuado um cálculo ponderado das várias caldas utilizadas de modo a simular uma única calda homogénea, através da fórmula (*): $\frac{(V_{P1} \times P_{M1}) + (V_{P2} \times P_{M2}) + (V_{P3} \times P_{M3})}{P_{M1} + P_{M2} + P_{M3}}$

* Onde V_p – Volume ponderado e P_M – Pressão média

5.5.2. Metodologia aplicada

Mesmo após a aplicação das premissas enunciadas anteriormente, ainda existiam alguns impedimentos específicos à aplicação do método GIN. Foram eles os seguintes:

- Dados originais das absorções apresentados em kg de cimento por trecho;
- Três tipos de caldas com diferentes relações A/C: 3/1, 2/1 e 1/1;
- Vários trechos injetados em simultâneo.

Como já foi referido, para a definição do GIN é necessário que os valores de absorção sejam apresentados em l/m de calda de cimento, e que seja utilizada apenas uma calda no decorrer do tratamento.

De seguida será então apresentada a metodologia aplicada que teve como objetivo a resolução desses impedimentos, permitindo assim a aplicação do método GIN:

- a) Foi admitido que a calda utilizada era constituída apenas por água e cimento, pois nem todos os registos indicavam a utilização de aditivos/adjuvantes;
- b) Nos casos em que vários trechos foram injetados em simultâneo, os totais de cimento foram divididos de forma homogénea pelo número de trechos injetados. Esta decisão foi tomada com base no facto de não existir maneira de verificar quais dos trechos absorveram mais ou menos cimento;
- c) A quantidade total de cimento injetado por trecho foi dividida por cada metro dos respetivos trechos; passando as unidades de absorção de cimento a serem kg/m;
- d) As relações A/C utilizadas foram X l de água para cada kg de cimento, logo numa calda 3/1, sabendo que foram injetados 100 kg de cimento nesse trecho é possível dizer que foram injetados também 300 l de água;
- e) Foi repetido o passo c), desta vez para os valores de água injetados por trecho, extrapolados no passo d);
- f) As unidades de absorção de cimento foram convertidas de kg/m para l/m, assumindo uma massa específica do cimento de 3 150 kg/m³;
- g) Às absorções de cimento foram adicionados as respetivas absorções de água, obtendo-se um volume médio V_M de calda injetada por metro de furo, para cada uma das três diferentes caldas utilizadas;
- h) A fórmula apresentada na tabela 5.8 foi então aplicada, de modo a criar uma única calda teórica homogénea, que englobasse as características das três caldas utilizadas na realidade;
- i) Com as várias pressões de injeção aplicadas para injetar as diferentes caldas foi calculada uma média aritmética, obtendo-se uma pressão média P_M referente à calda teórica calculada;
- j) Os pares de dados (V_P , P_M) foram então introduzidos na tabela 5.9, sendo discriminados por cada trecho de cada furo da fiada F-3, sendo que os dados referentes às fiadas F-1 e F-2 encontram-se no anexo 1.
- k) Estes valores foram posteriormente inseridos em gráficos V_P/P_M de modo a ser possível definir graficamente a curva GIN.

Tabela 5.9 - Dados processados para o fundo do vale referentes à execução da cortina de impermeabilização F-3

"MARGEM DIREITA"																						
Furos	E 3.2		E 3.3		E 3.4		E 3.5		E 3.7		E 3.9		E 3.11		E 3.13		E 3.15		E 3.17		E 3.19	
Trechos	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M
0-3	140	173	111	200	55	200	121	173	132	500	204	173	166	173	568	45	719	141	329	150	211	173
3-8	141	245	66	400	13	400	225	346	1141	346	138	346	53	300	198	300	132	150	198	300	26	300
8-13	17	600	25	600	13	400	66	600	317	424	79	450	812	436	99	520	290	424	0	0	79	450
13-18	17	600	25	600	13	400	13	1000	189	824	555	949	1237	589	66	600	199	1000	0	0	711	824
18-23	17	600	25	600	13	400	33	1000	424	824	100	1000	0	589	66	600	199	1000	0	0	425	794
23-28	17	600	25	600	13	400	33	1000	424	824	50	1000	0	589	17	1000	705	794	0	0	0	794

"MARGEM ESQUERDA"																				
Furos	E 3.1		E 3.2		E 3.3		E 3.4		E 3.5		E 3.6		E 3.8		E 3.10		E 3.12		E 3.14	
Trechos	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M
0-3	604	173	140	173	111	200	55	200	121	173	175	173	147	173	477	173	270	173	413	173
3-8	341	366	141	245	66	400	13	400	225	346	183	245	116	245	363	346	169	245	186	245
8-13	341	366	17	600	25	600	13	400	66	600	100	600	334	548	588	490	166	600	40	400
13-18	219	932	17	600	25	600	13	400	13	1000	66	1000	33	1000	44	1000	66	1000	40	400
18-23	219	932	17	600	25	600	13	400	33	1000	66	1000	33	1000	44	1000	66	1000	40	400
23-28	219	932	17	600	25	600	13	400	33	1000	0	0	33	1000	44	1000	66	1000	40	400



Furos primários



Furos secundários

No entanto, como os dados utilizados eram apenas uma adaptação dos dados reais, obtidos através da utilização do método de Houlby, foi necessária a realização de uma análise prévia dos gráficos, antes do ajuste das curvas GIN (tabela 5.10).

Esta análise consistiu na identificação de pontos afastados das nuvens de pontos principais, designados de "outliers", e na procura de justificações para o seu afastamento. Esta foi efetuada através da sobreposição gráfica da informação referente à localização e orientação dos furos de injeção realizados ao longo do eixo da barragem com a litologia do maciço, bem como com os valores de absorção registados.

Os *outliers* encontram-se identificados nas figuras 5.10 e 5.11, enquanto que as respetivas justificações se encontram explicitadas nas tabelas 5.12 e 5.13, com a respetiva legenda na tabela 5.13. Para as margens F-1 e F-2, os outliers e suas justificações encontram-se nos anexos 2 e 3 respetivamente.

Realizando uma breve análise a estas figuras, é possível observar que na margem direita existe uma nuvem de pontos mais dispersa do que na margem esquerda, o que corrobora a ideia apresentada anteriormente: aquela margem apresenta piores características geotécnicas quando comparada com a oposta.

Tabela 5.10 - Considerações a tomar aquando da análise dos gráficos representados nas figuras 5.10 e 5.11

Aspetos a ter em conta	Justificação
Pontos dos gráficos P/V aparecem em patamares (P= 200, 400, 600, etc)	Método de Houlby foi utilizado na execução dos furos, o que significa que foram definidos patamares máximos de pressão para profundidades específicas
Não existência de pontos com baixo P e alto V nos gráficos referentes á fiada F-2	Devido ao facto da fiada F-2 ter sido a última a ser injetada, a grande maioria das descontinuidades abertas (e portanto fáceis de injetar) já foram tratadas pelas outras duas fiadas
Predominância de furos primários entre os outliers	Como são os primeiros furos a serem injetados, são mais prováveis de atravessar descontinuidades abertas e outros acidentes geológicos
Pontos referentes a pressões > 800 kPa não foram identificados como outliers	A explicação da sua localização é conhecida: as pressões foram impostas pelo método de Houlby (ver secção 4.4.1.1.)

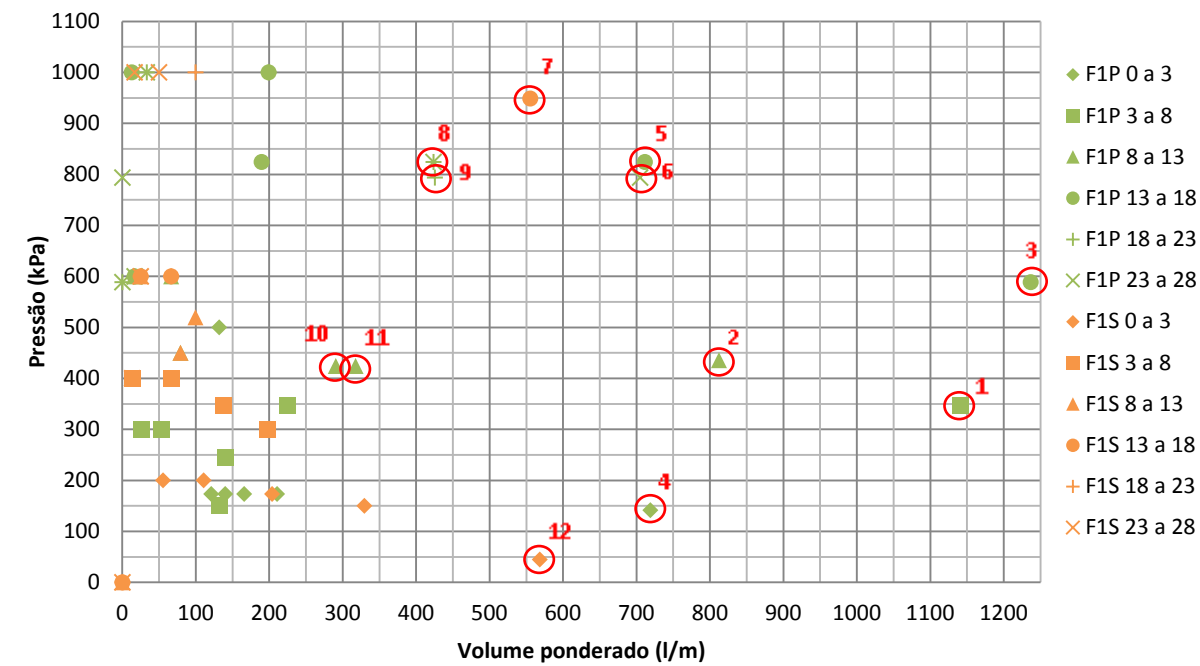


Figura 5.10 - Outliers identificados para a margem direita da fiada F-3

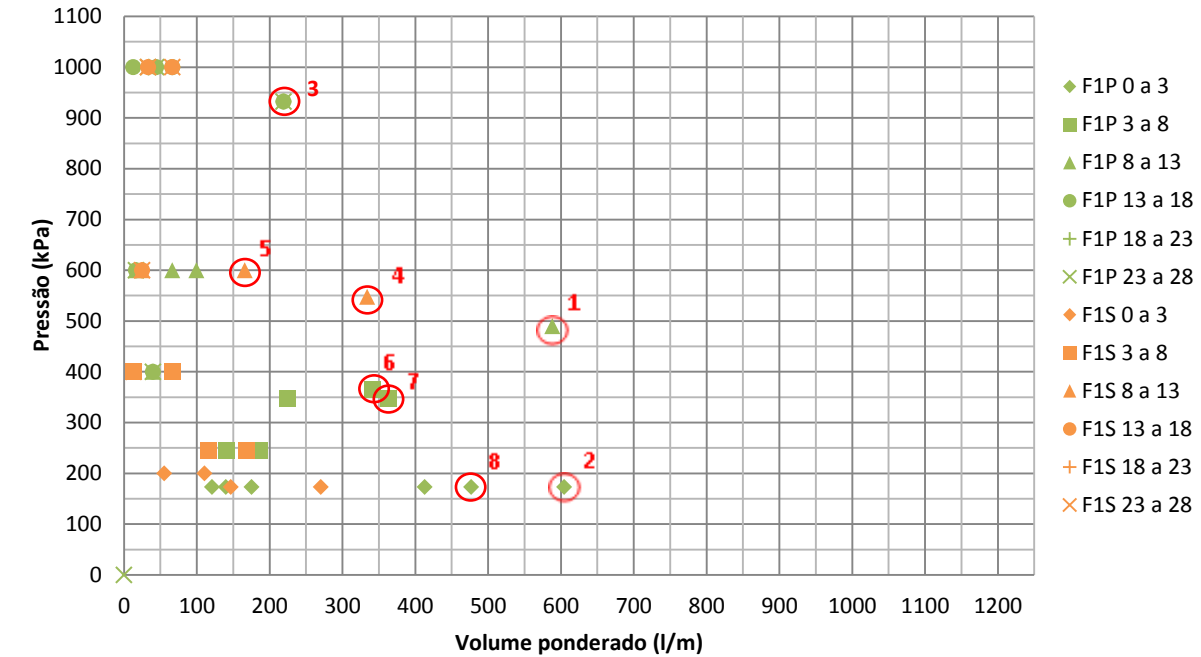


Figura 5.11 - Outliers identificados para a margem esquerda da fiada F-3

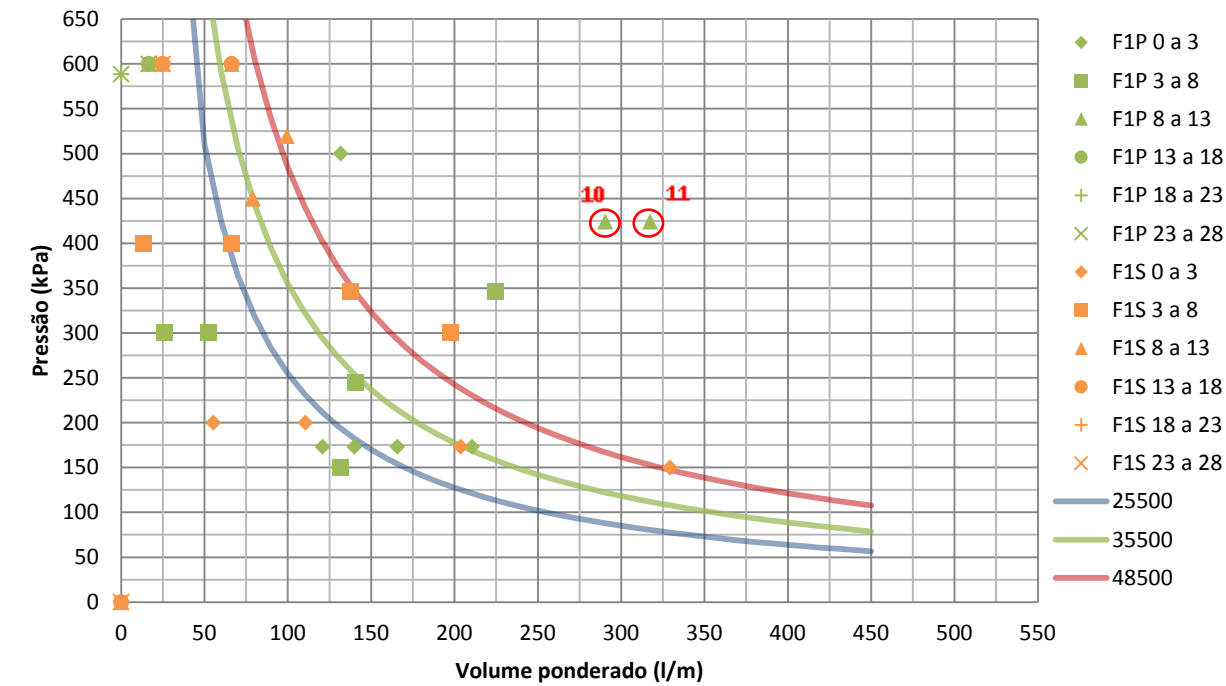


Figura 5.12 - Adaptação de possíveis curvas GIN aos dados referentes às injeções efetuadas na margem direita da fiada F-3

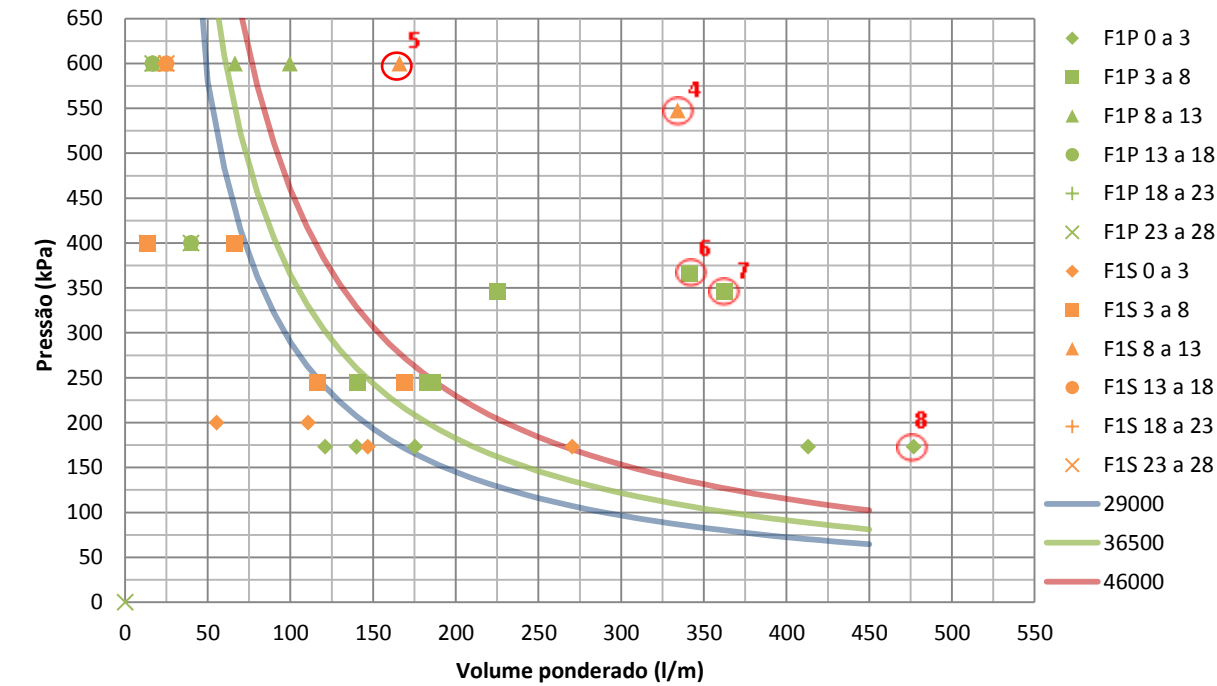


Figura 5.13 - Adaptação de possíveis curvas GIN aos dados referentes às injeções efetuadas na margem esquerda da fiada F-3

Tabela 5.11 - Outliers referentes à Fiada F-3, margem direita


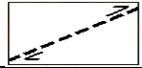

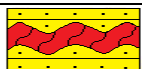






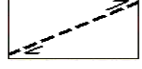
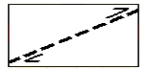
Ponto nº	Furo	Trecho(s)	Ordem	Valores		Causa provável	Observações
				V _m (l/m)	P _m (kPa)		
1	E 3.7	3 - 8	P	1141	346		
11	E 3.7	8 - 13	P	317	424		Falha F-2
8	E 3.7	18 - 28	P	424	824		
7	E 3.9	13 - 18	S	555	949		
2	E 3.11	8 - 13	P	812	436		
3	E 3.11	13 - 18	P	1237	589		1450 kg de calda 1:1 injetada na fase ascendente
12	E 3.13	0 - 3	S	568	45		Falha F-2
4	E 3.15	0 - 3	P	719	141		
10	E 3.15	8 - 13	P	290	424		
6	E 3.15	23 - 28	P	705	794		Falha F-3
5	E 3.19	13 - 18	P	711	824		Falha F-3
9	E 3.19	18 - 23	P	425	794		Zona afetada pela falha F-3 atravessada no trecho anterior

Tabela 5.12 - Outliers referentes à Fiada F-3, margem esquerda




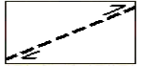
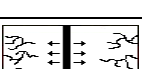





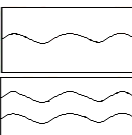
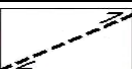

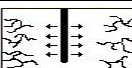
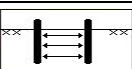
Ponto nº	Furo	Trecho(s)	Ordem	Valores		Causa provável	Observações
				V _m (l/m)	P _m (kPa)		
2	E 3.1	0 - 3	P	604	173		Injeção terminada apenas por ter sido atingido o limite máximo de calda a injetar por trecho
6	E 3.1	3 - 13	P	341	366		Falha F-1
3	E 3.1	13-28	P	219	932		Injeção conjunta de 3 trechos pode esconder presença da falha F-4
4	E 3.8	8 - 13	S	334	548		
8	E 3.10	3 - 8	P	363	346		
1	E 3.10	8 - 13	P	588	490		
5	E 3.12	8 - 13	S	166	600		

Tabela 5.13 - Simbologia utilizada e seu significado

Símbolo	Descrição
	Quartzitos e grés quartzíticos
	Xistos (grafitosos, argilosos e sericíticos)
	Xistos grauvacóides
	Mudança de litologia
	Contacto com falha ou zona de esmagamento
	Fuga de calda para a superfície
	Fracturação hidráulica
	Comunicação entre furos

5.5.3. Definição do GIN

Como foi referido no cap 4.3.2., a aplicação do método GIN envolve a definição de três parâmetros, sendo eles:

1. A curva GIN;
2. A pressão máxima de injeção;
3. O volume máximo de calda a injetar e o seu traço.

Serão de seguida identificadas e justificadas, as escolhas tomadas em relação à definição de cada um deles.

5.5.3.1. Curva GIN

Caso a cortina de impermeabilização fosse projetada de origem através do método GIN, o processo de seleção do valor GIN seguiria o enunciado na secção 4.3.2., ou seja, propondo-se um valor que tivesse em consideração as condições geológicas presentes, o valor da água perdida por percolação e a probabilidade de ocorrência de fenómenos de levantamento hidráulico, confirmando-se esse valor através de ensaios de injectabilidade em cada zona do maciço que se considerasse homogénea. No

entanto, este cenário não corresponde à realidade, e como tal, foram necessárias algumas adaptações.

Para o caso em estudo, a curva GIN foi escolhida com base em dois pontos principais:

- a. Pela análise da informação disponível referente ao maciço de fundação obtida através da execução de sondagens e ensaios de absorção de água tipo Lugeon, foi possível constatar que este se apresentava a partir de profundidades da ordem dos 18 m. Como tal, foi considerado que a seleção de valores GIN elevados iriam representar um desperdício de calda, injetando-se mais do que o necessário para atingir os valores de permeabilidade pretendidos. Para além disso, a utilização de pressões de injeção elevadas aumentaria a probabilidade de ocorrência de fenómenos de fracturação hidráulica e, como foi mencionado na secção 5.4.2, esses fenómenos ocorreram na realidade, associados a pressões de injeção elevadas (> 1000 kPa) aquando da execução de ensaios de absorção de água tipo Lugeon a profundidades superiores a 18m.
- b. Após a análise dos gráficos provenientes da adaptação dos dados originais (figuras 5.10 e 5.11), e consequente eliminação dos *outliers* existentes, foram inseridas nestes várias curvas GIN de diferentes valores, de modo a identificar qual destas se adaptaria melhor aos dados existentes (figuras 5.12 e 5.13). Quando representado num gráfico V/P, o ponto referente à conclusão situa-se, geralmente, nas proximidades da curva GIN definida para a respetiva obra, sendo possível extrapolar que a curva GIN mais apropriada para uma determinada fiada é aquela que contenha nas suas imediações o maior número de pontos.

Foi também realizada esta inserção das curvas GIN nos gráficos referentes às fiadas F-1 e F-2, encontrando-se os resultados no anexo 4.

Como tal, a curva GIN mais apropriada para cada um dos gráficos será aquela que incluir o maior número de pontos referentes a diferentes furos e trechos, e que ao mesmo tempo apresente os valores mais reduzidos.

O resultado da adoção destes dois aspetos foi a definição de seis curvas GIN (três fiadas em cada uma das 'margens'), encontrando-se os seus valores discriminados na tabela 5.14.

De acordo com Lombardi (1996), estes GIN correspondem a intensidades de injeção elevadas (F-2) a muito elevadas (F-1 e F-3), o que é um resultado aceitável visto que a fiada F-2 foi a última a ser realizada portanto a intensidade de injeção utilizada foi menor.

Tabela 5.14 - Valores GIN definidos para as várias fiadas

GIN	Fiada		
	F-1	F-2	F-3
Margem direita	28000	21000	35500
Margem esquerda	28000	20500	29000

5.5.3.2. Pressão máxima de injeção

Como mencionado na secção 4.3.2., a pressão máxima de injeção selecionada para uma determinada zona deve estar relacionada com a pressão hidráulica espectável a que essa zona será exposta durante o tempo de funcionamento da obra, e é independente do valor GIN adotado, dependendo apenas do objetivo do projeto.

Sendo a obra em estudo uma barragem de enrocamento com o objetivo de fornecer água para rega e para consumo, a perda de água por percolação não é tão importante como em barragens de betão com o objetivo de produção de energia e, portanto, a pressão máxima de injeção não necessita de ser tão elevada.

Lombardi (1996) sugere a utilização de pressões máximas equivalentes a duas a três vezes a pressão hidráulica a que o maciço será sujeito. A altura da albufeira da barragem da Apartadura, no seu nível de pleno armazenamento ronda os 40 m, portanto o maciço encontra-se sujeito a pressões da ordem dos 400 kPa e, segundo Lombardi (*op.cit.*), a pressão máxima a definir seria no mínimo de 800 kPa. No entanto, tendo em consideração o objetivo da barragem, bem como as características do maciço (são a partir dos 18 m), não foi tida como necessária a aplicação de pressões tão elevadas, tendo o seu valor máximo sido definido como 600 kPa.

5.5.3.3. Volume máximo de calda a injetar e seu traço

Na definição do volume máximo de calda a injetar por metro num determinado furo devem pesar as condições locais, nomeadamente o risco de perda de calda para a superfície ou para alguma cavidade (secção 4.3.2).

Analisando as condições do maciço de fundação, foi possível observar que, em zonas mais superficiais, este se encontrava muito meteorizado, melhorando a sua qualidade em profundidade. Embora existam várias falhas e intercalações xistosas na área em estudo (possíveis zonas de fuga da calda), sendo a litologia do maciço composta maioritariamente por arenitos e quartzitos, não é

espectável a existência de grandes cavidades. Considerando estes aspetos, o volume máximo definido foi de 350 l/m.

Para a definição da relação A/C da calda teórica obtida anteriormente (ver secção 5.5.2.) foi aplicada a seguinte metodologia:

- a) As quantidades de cimento injetadas por trecho foram somadas em cada furo, obtendo-se assim a quantidade total de cimento injetada em cada furo constituinte das várias fiadas;
- b) Esse total foi de seguida dividido em três parcelas correspondentes às caldas com diferentes relações A/C injetadas (3/1, 2/1 e 1/1),
- c) Somaram-se então todas as parcelas referentes a uma dada relação A/C de cada furo da margem direita da fiada F-3; repetindo-se este passo para cada uma das restantes parcelas;
- d) Repetiu-se novamente o passo c), desta vez para a margem esquerda;
- e) Repetiram-se os passos c) e d) para a fiada F-1 e F-2, obtendo-se assim as quantidades de cimento injetadas, discriminadas pela relação A/C para cada fiada em ambas as margens (tabela 5.15);
- f) As relações A/C utilizadas foram X l de água para cada kg de cimento, logo numa calda 3/1, sabendo que foram injetados 100 kg de cimento nesse furo é possível dizer que foram injetados também 300 l de água;
- g) Os valores discriminados na tabela 5.15 foram de seguida multiplicados pela fração referente à água nas relações A/C das caldas utilizadas, por exemplo, as quantidades de cimento injetado referentes à calda 3:1 foram multiplicados por 3 (tabela 5.16);
- h) Recorrendo aos dados das tabelas 5.15 e-5.16, foi utilizada a seguinte fórmula para determinar os traços A/C das diferentes caldas teóricas para cada fiada em ambas as margens:
$$\frac{A_{3:1} + A_{2:1} + A_{1:1}}{C_{3:1} + C_{2:1} + C_{1:1}} \quad (5.1)$$
- i) Da aplicação da fórmula apresentada no passo anterior obtiveram-se valores correspondentes à fração referente à água nas relações A/C das caldas teóricas seleccionadas, sendo que para uma maior facilidade de consulta a tabela 5.17 apresenta já um resumo das várias relações A/C obtidas.

Tabela 5.15 - Totais de cimento injetados em ambas as margens para as três fiadas

Margem direita					Margem esquerda				
Cimento (kg)	F-3	F-1	F-2	Totais	Cimento (kg)	F-3	F-1	F-2	Totais
3:1	6400	9250	5932	21583	3:1	6900	6150	5536	18586
2:1	6250	3250	3200	12700	2:1	2750	150	1580	4480
1:1	14500	6550	2000	23050	1:1	8750	1550	240	10540
	27150	19050	11133	57333		18400	7850	7356	33606

Tabela 5.16 - Totais de água injetados em ambas as margens para as três fiadas

Margem direita					Margem esquerda				
Água (l)	F-3	F-1	F-2	Totais	Água (l)	F-3	F-1	F-2	Totais
3:1	19200	27751	17797	64748	3:1	20700	18451	16607	55758
2:1	12500	6500	6401	25400	2:1	5500	300	3160	8960
1:1	14500	6550	2000	23050	1:1	8750	1550	240	10540
	46200	40801	26198	113198		34950	20301	20007	75258

Tabela 5.17 - Relações A/C das caldas teóricas selecionadas para ambas as margens, por fiada

Traço	Fiada		
	F-1	F-2	F-3
Margem direita	2,1/1	2,4/1	1,7/1
Margem esquerda	2,6/1	2,7/1	1,9/1

Da aplicação dos três parâmetros mencionados anteriormente (curva GIN, pressão máxima de injeção e volume máximo de calda a injetar e respetiva relação A/C) resultaram as figuras 5.14 e 5.15, referentes à fiada F-3 em ambas as margens. Os gráficos referentes às restantes fiadas encontram-se no anexo 5.

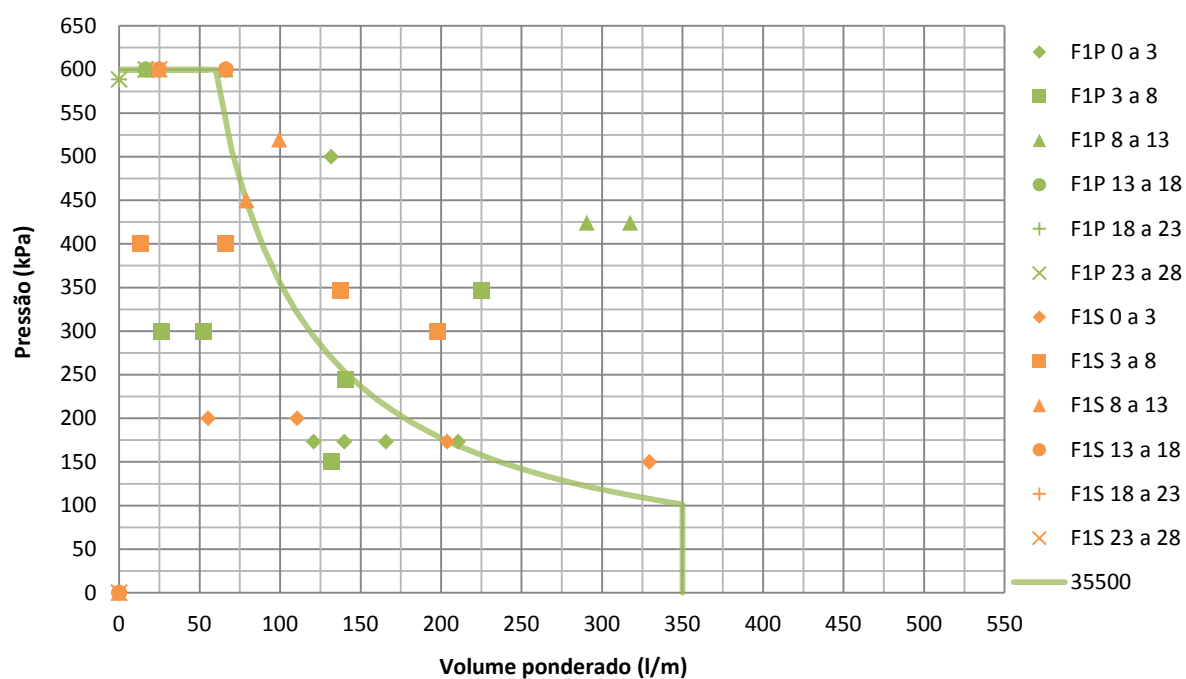


Figura 5.14 - Curva GIN definida para a zona da fiada F-3 referente à margem direita

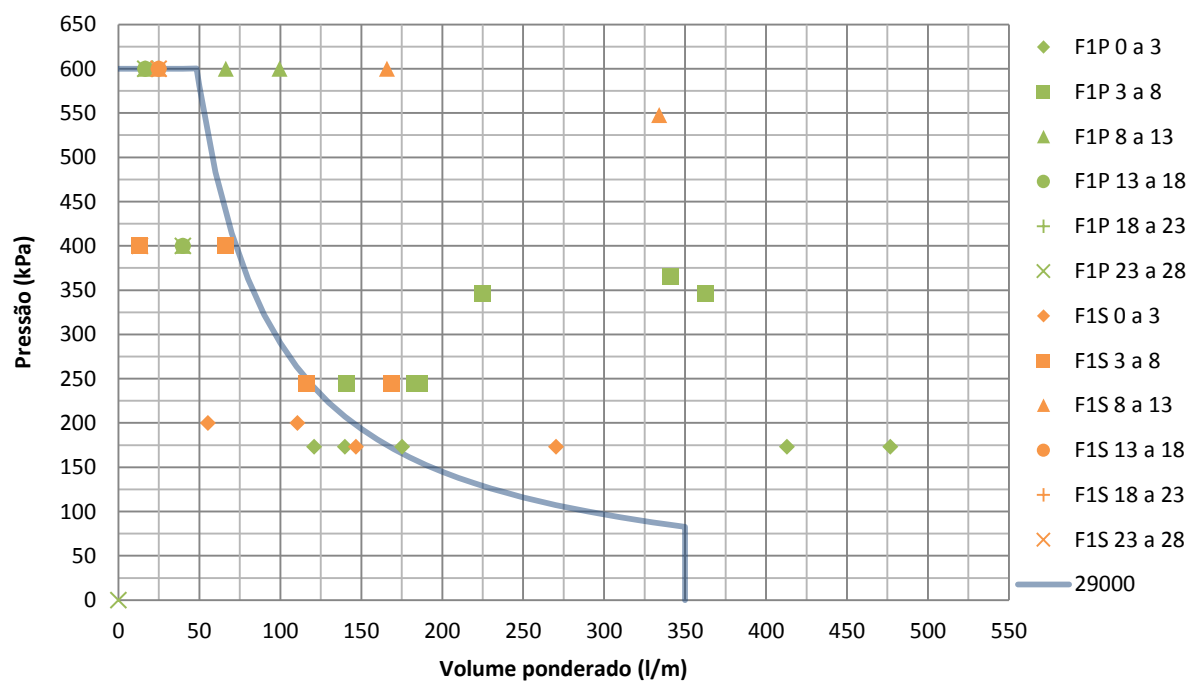


Figura 5.15 - Curva GIN definida para a zona da fiada F-3 referente à margem esquerda

5.6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como foi possível observar na tabela 5.14, os valores GIN escolhidos para as várias fiadas não foram iguais. Isto deve-se ao facto de que conforme as fiadas vão sendo injetadas, a permeabilidade do maciço vai diminuindo gradualmente, o que significa que a segunda fiada a ser realizada irá encontrar um maciço com menos descontinuidades abertas e outros acidentes geológicos para tratar quando comparada com a primeira.

Como tal, o GIN resultante da segunda fiada será inferior ao da primeira, e claro, o da terceira fiada inferior ao da segunda; quer pela utilização de pressões de injeção mais baixas ou pela injeção de um menor volume de calda de cimento.

Como foi mencionado no cap.5.4, a ordem de execução das fiadas foi: $F-3 \rightarrow F-1 \rightarrow F-2$, e, analisando os valores da tabela 5.14 é possível confirmar a teoria mencionada anteriormente:

$$\bullet \quad GIN_{F-3} > GIN_{F-1} > GIN_{F-2}$$

Da análise da tabela 5.15 é possível retirar algumas conclusões, sendo uma delas que a quantidade de calda injetada por fiada diminui segundo a ordem de execução destas ($F-3 > F-1 > F-2$), o que é coerente com a ideia de diminuição do número de descontinuidades e outros acidentes geológicos por tratar ao longo da empreitada.

Outra das conclusões foi que a quantidade de calda injetada na margem direita foi superior à da outra margem. Novamente, este facto é coerente com os dados conhecidos do maciço: a margem direita apresenta um maior número de acidentes geológicos e mudanças litológicas, portanto necessita de mais calda para os tratar.

Finalmente, após a análise das relações A/C obtidas na tabela 5.17 chegaram-se a conclusões semelhantes às obtidas na interpretação dos dados anteriores, o que tem lógica, considerando que todos estes se encontram relacionados entre si, de uma ou outra maneira.

As caldas tornam-se mais finas segundo a ordem de execução das fiadas ($F-3 > F-1 > F-2$), isto porque, as descontinuidades mais abertas foram injetadas durante a primeira fiada, sendo necessária a utilização de caldas mais finas para tratar as restantes descontinuidades menos abertas. Para além disso, as caldas utilizadas na margem direita foram mais espessas do que na margem esquerda, algo justificável novamente pela pior qualidade do maciço na margem direita.

É no entanto importante realçar o seguinte ponto no que toca às relações A/C: Lombardi favorece a utilização de caldas muito espessas, com relações A/C preferencialmente entre 0,7:1 a 1:1. (secção

4.3.2.), enquanto que as caldas teóricas projetadas são muito finas, sendo que a calda mais espessa apresenta uma relação A/C de 1,7:1, o que é quase o dobro do previsto por Lombardi.

Este ponto é no entanto justificável pelo facto de que Lombardi (1993), para além de utilizar caldas muito espessas, também sugere a aplicação de superplastificantes, que têm como efeito a redução da viscosidade da calda (secção 2.3.1.), o que por sua vez aumenta a sua velocidade de escoamento (secção 2.3.2.2.) e penetrabilidade.

Como no decorrer da aplicação da metodologia descrita no cap. 5.5.2, foi admitido que a calda injetada era apenas constituída por água e cimento, não existiu a possibilidade de alterar a penetrabilidade desta através da adição de superplastificantes ou de outro qualquer tipo de aditivos. As caldas teóricas seleccionadas tiveram portanto que ser naturalmente mais finas do que a calda espessa com superplastificantes sugerida por Lombardi, de modo a apresentarem penetrabilidades semelhantes a esta última.

Os últimos resultados a serem discutidos, e talvez os mais importantes, encontram-se relacionados com o facto de que a fiada F-3 apresenta ao mesmo tempo os valores GIN mais díspares entre margens e os traços de calda médios mais semelhantes, enquanto que na fiada F-1 observa-se o comportamento oposto, sendo os valores GIN idênticos e os traços de calda médios mais díspares. A justificação que será apresentada de seguida para estes resultados basear-se-á nas diferenças das características e qualidade do maciço entre as margens direita e esquerda.

Como foi mencionado anteriormente (secção 5.3.1 e 5.5.2), a margem direita apresenta piores características geotécnicas do que a margem esquerda, encontrando-se mais meteorizada. Como tal, é possível assumir que as discontinuidades existentes nessa margem apresentem maiores aberturas e/ou continuidade.

No entanto, aquando da execução das injeções, esta teoria não tinha como ser comprovada visto que os dados obtidos a partir das figuras 5.10 e 5.11, referentes aos outliers identificados após a aplicação do método GIN (com as devidas adaptações) não se encontravam disponíveis, pois:

- O método GIN ainda se encontrava no início do seu desenvolvimento;
- Os dados necessários para a realização dos gráficos presentes nas figuras 5.10 e 5.11 apenas podem ser obtidos após a execução das injeções.

Vem daí que a relação A/C média das caldas utilizadas na execução da fiada F-3 sejam tão semelhantes: 1,7/1 para a margem direita e 1,9/1 para a margem esquerda.

Ao serem utilizados traços tão semelhantes, assumindo que a premissa adotada anteriormente é verdadeira, a calda espessa injetada na margem direita conseguiu penetrar nas descontinuidades existentes enquanto que na margem esquerda, essa mesma calda espessa encontrou dificuldades em penetrar nas descontinuidades mais fechadas, levando a que a nega fosse atingida sem que as descontinuidades tivessem sido realmente injetadas, explicando-se assim a disparidade de valores GIN entre as duas margens (35500 para a margem direita e 29000 para a margem esquerda).

Na injeção da fiada seguinte, F-1, presume-se que este problema tenha sido detetado, pois observa-se uma maior diferença entre as relações A/C médias das duas margens quando comparadas com a fiada anterior: na fiada F-3 a diferença era de 11,8%, enquanto que na fiada F-1 esta diferença é mais do dobro, situando-se nos 23,8% (2,1/1 e 2,6/1 para margem direita e esquerda respetivamente).

Pressupõe-se que o aumento da finura média da calda utilizada na margem esquerda da fiada F-1 tenha sido suficiente para permitir a injeção das descontinuidades não tratadas pela fiada F-3, pois o valor GIN associado mantém-se constante em ambas as fiadas (29000 e 28000 para fiada F3 e F1 respetivamente), enquanto que na margem direita este diminui, como seria de esperar.

Aquando da execução da última fiada, F-2, estes problemas já se encontram remediados, visto os valores GIN diminuírem em ambas as margens e, embora este sejam novamente idênticos (21000 e 20500) não é motivo de alarme pois a esta altura o maciço já se encontra tão tratado que as diferenças de qualidade entre as margens já não são identificáveis através da comparação destes valores.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação apresenta-se uma síntese do estado da arte do tratamento de fundações rochosas de barragens por injeção de caldas à base de cimento. Nesse contexto, abordam-se os aspectos relacionados com todo o processo de tratamento, desde a sua concepção até à conclusão da sua execução, mencionando-se um pouco da sua evolução histórica, bem como as diferentes metodologias consagradas utilizadas atualmente um pouco por todo o mundo.

Aquele tipo de injeções incluem-se no grupo das injeções de permeação, e em fundações rochosas podem ser adotadas para reduzir os caudais percolados sob a barragem, aumentar a capacidade resistente dos maciços rochosos ou, até, preencher cavidades de dissolução.

Numa breve síntese dos diferentes tipos de caldas existentes e da sua utilidade nestas injeções, verifica-se que a seleção do tipo de calda adequada é função das características pretendidas para a mesma. Estas são diferentes conforme os objetivos pretendidos, listados no parágrafo anterior, e adaptadas às características dos maciços onde são injetadas, podendo variar, por exemplo, entre caldas de cimento puras e resinas *epoxy*.

Uma das desvantagens das caldas de cimento puro é serem instáveis e quando submetidas a pressão de injeção elevadas, as partículas tendem a colmatar e a bloquear o caminho de percolação. Deste modo, naturalmente, a tendência é transformar estas misturas em suspensões estáveis, nomeadamente com a adição de bentonite que atua como plastificante.

A calda ideal é aquela que tem propriedades de fluxo e penetração excelentes inclusive em fissuras mais finas; contudo à medida que ela se afasta do furo, a velocidade de percolação diminui e a calda começa a espessar e a resistir ao deslocamento. Para melhorar/adaptar a sua reologia às condições das fraturas, as caldas podem ser preparadas com a adição de aditivos, adjuvantes ou outros materiais.

Todo o processo de tratamento do maciço por cortinas de impermeabilização tem início muito antes da sua construção. A caracterização geológica e geotécnica do maciço de fundação é indispensável para a projeção de um tratamento eficaz e para o correto dimensionamento da cortina. Desta caracterização devem constar a descrição da litologia do maciço, das características das famílias de descontinuidades que nele existam, bem como das redes de percolação que elas controlam.

Para o estudo destas redes de percolação são efetuados ensaios de absorção de água, geralmente do tipo Lugeon. Estes ensaios permitem a averiguação da condutividade hidráulica equivalente dos

maciços, tornando possível inferir da necessidade de execução de uma cortina de impermeabilização. Verifica-se que para absorções entre 1-3 Lu, pode não ser necessário o tratamento, a não ser que o preço da perda de água seja significativo. Entre 3-10 Lu as caldas de cimento podem e devem ser utilizadas tendo em conta a necessidade de utilizar caldas mais fluidas ou com aditivos/adjuvantes. Para valores superiores a 10 Lu as caldas à base de cimento usam como material o cimento Portland tradicional.

Para além da condutividade hidráulica, o conhecimento adequado de outras características hidrogeológicas, como sejam o regime de percolação e comportamento das fraturas, possibilitam definir os critérios de fecho das injeções, ou seja, a observação de valores capazes de indicar que foi obtida a redução da permeabilidade natural do maciço injetado até valores admissíveis, definidos pelo Projetista.

Estes critérios são vários, podendo basear-se quer na leitura da condutividade hidráulica do maciço ao longo das injeções, como prova que a permeabilidade deste se encontra realmente a diminuir, quer na leitura das quantidades de calda injetada por cada metro de furo, baseando-se no facto que uma menor absorção de calda geralmente traduz o fecho das descontinuidades existentes, que por sua vez podem significar a redução da condutividade hidráulica do maciço. Existe ainda outro critério, que resulta da inspeção visual dos tarolos provenientes dos furos de injeção, em conjunto com a análise de perfis geológicos e da cartografia geológica, que permite avaliar o número e grau de fecho das descontinuidades existentes e, conseqüentemente, o grau de “impermeabilização” do maciço já atingido.

Um dos aspetos que deve ficar definido sempre que possível passa pela averiguação da necessidade de execução de galerias de injeção. Isto porque o equipamento utilizado para a sua execução não se encontra geralmente em obra e toda a metodologia relacionada com a execução do tratamento é modificada aquando da sua utilização. Para além disso, os custos da eventual execução de galerias, caso estas não constem do projeto, são muito elevados.

O próximo passo no dimensionamento passa pela definição das dimensões da cortina de impermeabilização que se pretende realizar, como é o caso da profundidade a atingir, da extensão ao longo da qual esta será realizada, bem como do espaçamento entre os furos e as suas orientações. Embora haja outros métodos utilizados internacionalmente para definir o espaçamento entre furos, o mais utilizado é o de *split spacing*, utilizando-se os outros apenas em situações particulares, função de variações locais nos defeitos do maciço rochoso. O espaçamento inicial dos furos primários tende a oscilar entre 6 e 12 m, em função da eventual heterogeneidade do maciço.

Tal como muitos dos aspetos anteriormente abordados, a escolha das técnicas de furação a utilizar para a execução da cortina também irá depender das características do maciço, da calda escolhida para injeção e das especificações da cortina a realizar. A furação em maciços rochosos é feita geralmente à rotação, recomendando alguns autores, nomeadamente Silva Gomes (1991) que os furos primários sejam todos carotados; nos restantes pode recorrer-se a rotopercussão, mais rápida e mais barata.

A pressão de injeção é também definida, existindo diferentes correntes no que toca ao seu critério de seleção. A escola europeia defende o uso de pressões elevadas de modo a se obter um preenchimento adequado das fraturas, enquanto que a escola americana é apologista do uso de pressões mais baixas, de modo a evitar fenómenos de levantamento ou fracturação hidráulica. Cada uma destas aproximações tem os seus méritos e cada autor defende a que considera mais apropriada. É de ressaltar que todos estes valores devem ser considerados como indicadores, existindo sempre a hipótese de realização dos acertos necessários a estes valores no decorrer da empreitada.

Os ensaios de injectabilidade são geralmente realizados apenas na fase construtiva, no início da empreitada de execução da cortina, e têm como objetivo permitir a adequação do (pré)dimensionamento da injeções de calda de cimento, bem como a escolha da formulação ótima da calda a utilizar. Com os dados obtidos a partir da execução destes ensaios num trecho piloto, também é possível realizar uma previsão do consumo de calda para a execução da cortina. Este é um aspeto importante, pois permite reduzir as despesas que existiriam caso tivesse sido necessária a mistura de mais calda do que a prevista no projeto, ou caso a quantidade de calda misturada tivesse sido em excesso.

Na escolha da sequência de injeção é necessário ter em conta, para além das características do maciço, as características da calda adotada. Existem vários procedimentos disponíveis, sendo alguns mais seguros, como o caso do de injeção descendente, onde cada trecho injetado encontra-se sempre sob uma área do maciço já tratada no trecho anterior, permitindo assim a utilização de pressões de injeção mais elevadas, dificultando ao mesmo tempo a fuga de calda para a superfície. Contudo, existem também outros procedimentos mais rápidos e baratos, como o de injeção ascendente, onde o furo é realizado por completo e só depois injetado cada trecho. É no entanto necessário que o maciço apresente qualidade suficiente para não exista o risco de colapso das paredes do furo.

De modo a ser possível realizar qualquer um destes procedimentos e em particular na ausência de uma galeria de injeção, é muitas vezes necessária a execução de lajes ou maciços de injeção de modo

a estabilizar as zonas superficiais do maciço, bem como a utilização de equipamentos como tubos guia, de modo a estabilizar a coluna de injeção ou facilitar a colocação de obturadores à boca do furo.

No que toca ao controlo de qualidade, este tem de ser efetuado ao longo de todo o processo de tratamento. Antes do início da injeção este controlo passa pela análise das características das caldas utilizadas através da execução de ensaios de laboratório e de campo, bem como de diagrfias ou em alternativa carotagem do furo, de modo a recolher a maior quantidade de informação possível, permitindo um eventual reajuste dos parâmetros de injeção e, portanto, do dimensionamento.

Numa segunda fase, durante a injeção dos furos, são controlados os parâmetros de injeção, pressão, volume de calda e caudal, bem como vigiados possíveis fenómenos de levantamento hidráulico e de fuga de calda para a superfície, através um variado número e tipo de equipamentos, manuais ou automáticos, acoplados à coluna de injeção ou instalados à superfície do terreno.

Para a verificação da eficiência do tratamento, e embora existam métodos que oferecem uma estimativa dessa eficácia, como é o caso da utilização de ensaios de absorção de água tipo Lugeon no decorrer das injeções, ou a realização de medições da velocidade de ondas sísmicas P e S, antes e depois do tratamento, o único teste conclusivo consiste na instalação de piezómetros ao longo da fundação da barragem de modo a monitorizar as redes de percolação existentes no decorrer e após o enchimento da albufeira.

Com o passar dos anos, e caso as cortinas tenham sido dimensionadas ou injetadas incorretamente, pode-se dar o caso de lavagem da calda constituinte da cortina, sendo necessária a reinjecção desta com elevados custos associados, daí que a eficiência de todo processo que culmina na execução da cortina seja tão importante.

Devido à panóplia de parâmetros a contemplar no dimensionamento e da necessidade de eficiência da cortina executada, surgiram ao longo dos tempos várias metodologias, que visam englobar todos os aspetos descritos anteriormente, propostos por autores consagrados, tendo como base as suas experiências com o tratamento de maciços rochosos e execução de cortinas de impermeabilização.

Neste documento abordam-se quatro metodologias diferentes, cada uma com diferentes aplicabilidades e eficiência demonstradas em obras por todo o mundo e com diferentes pontos de vista sobre o modo de obtenção dos parâmetros a definir. A metodologia mais utilizada, e também mais antiga, é a proposta por Houlsby (1976; 1990), que defende a utilização de caldas progressivamente mais espessas, com o objetivo de injetar primeiro as discontinuidades mais fechadas, através do uso do método *split spacing*, e de pressões de injeção mais elevadas com o

aumento da profundidade de injeção, dependendo também da qualidade do maciço, utilizando pressões mais reduzidas em maciços de pior qualidade. O volume de calda a utilizar depende da quantidade, persistência e abertura das descontinuidades a preencher no maciço rochoso, estimando-se este volume de vazios através dos ensaios de absorção de água tipo Lugeon.

Silva Gomes (1991) apresentou uma metodologia com base em formulações teóricas, onde sugere que cada ordem dos furos constituintes da cortina de impermeabilização (primários, secundários e terciários, caso necessário) deva ter uma determinada função e cumprir objetivos diferentes. Esses objetivos passam pela injeção de descontinuidades com diferentes tipos de aberturas, sendo os furos primários responsáveis por injetar descontinuidades mais abertas do que aquelas injetadas pelos secundários, sendo para tal utilizadas caldas cada vez mais finas, ao contrário do método de Houslby. As pressões de injeção são então definidas de acordo com o objetivo do furo que se encontra a ser injetado e com as características da calda, e as quantidades de caldas a injetar limitadas de modo a impedir desperdícios e custos adicionais desnecessários. Este autor (*op. cit.*) é também apologista do recurso a furos de verificação carotados, de modo a averiguar a eficiência do tratamento e, caso seja necessário, do recurso a drenos para controlar a percolação ainda existente. Este método irá ser utilizado pela primeira vez numa barragem em Angola, num futuro próximo.

Lombardi e Deere (1993) apresentaram o conceito do GIN à volta do qual desenvolveram uma metodologia. Segundo eles, a utilização do GIN, que consiste no produto do volume de calda injetada num trecho de um 1 m com a pressão de injeção correspondente, aquando da paragem da injeção, em conjunto com a definição de limites de pressão de injeção e de volume de calda a injetar, permite prevenir completamente quaisquer fenómenos de levantamento ou fracturação hidráulica do maciço. Outro dos aspetos onde esta metodologia difere de todas as restantes é na utilização de uma calda única, homogénea, adaptada com recurso a aditivos para apresentar as melhores características possíveis de modo a melhor se adaptar às condições do maciço.

Finalmente, Wilson e Dreese (1998) sugeriram uma metodologia de dimensionamento, considerada pelos autores como um avanço em relação à metodologia convencional, derivada da proposta originalmente por Houslby (1976). O seu conceito fundamental passa por uma análise quantitativa detalhada de todos os parâmetros envolvidos no projeto e dimensionamento de uma cortina de impermeabilização, de modo a obter a maior eficiência possível. Wilson, Dreese e Bruce (2009), apresentaram algumas modificações a esta metodologia, focando-se na atualização dos vários passos originalmente propostos.

Para o Dono de Obra, a metodologia GIN é mais cómoda, pois permite controlar melhor o volume de calda injetado ou de eventuais fracturações induzidas no maciço; no entanto, poderá ser difícil

utilizar uma calda única em maciços muito heterogêneos; como tal, o método de Silva Gomes (1991) é uma solução de compromisso, tentando colmatar o melhor possível as discontinuidades.

Se o maciço rochoso apresenta absorções elevadas, é preferível fazer a sequência de injeção por fases, a fim de tentar confinar a zona de tratamento. Para que os resultados do processo de injeção sejam adequados, o critério de fecho deve preferencialmente ser definido para um volume injetado a uma pressão mínima, sendo que o método GIN facilita este passo.

Por sua vez, o método proposto por Wilson e Dreese (*op. cit.*) apresenta melhores resultados quando utilizado em obras importantes, pois é nestas que existe o acesso às melhores tecnologias disponíveis na atualidade.

No sentido de difundir o conhecimento do método GIN em Portugal, utilizou-se para caso prático os dados relativos à execução da cortina de impermeabilização da barragem da Apartadura, situada a Norte de Portalegre e Sudoeste de Marvão, na Ribeira das Reveladas. Na altura em que esta barragem foi construída, o método GIN estava a ser implementado pelo seu autor principal, o eng^o Lombardi.

Procede-se então à caracterização geral da barragem da Apartadura, identificando-se as suas diferentes zonas constituintes, seguida da delimitação da área em estudo para esta dissertação. Foi escolhida a zona de fundo de vale, realizando-se o seu enquadramento e zonamento geológico-geotécnico, identificando-se a presença de algumas falhas e delimitando o maciço em três zonas geotécnicas distintas. A metodologia de dimensionamento utilizada originalmente foi baseada no método de Houlby, convencional. As pressões de injeção fundamentaram-se nos resultados dos ensaios tipo Lugeon, bem como nas características do maciço, sendo as caldas utilizadas continuamente mais espessas. Uma das variações introduzidas à metodologia convencional utilizada foi relativa ao sequenciamento das injeções. Como a cortina de impermeabilização foi realizada após a construção da barragem, as três fiadas que a integram foram efetuadas a partir da galeria de drenagem, tendo sido necessária uma adaptação do método *split spacing* às condições presentes, o que levou à adoção de um espaçamento não uniforme.

Para a aplicação do método GIN, recorre-se quer aos dados provenientes dos registos de injeção da cortina disponibilizados pelo LNEC sob autorização do INAG, quer aos elementos constantes das dissertações de Carvalho (1992) e Ramos (1995). Contudo, realizaram-se algumas adaptações a esses dados, não só devido às diferenças existentes entre o método que se pretende utilizar e o realmente implementado, mas também devido à escassez de dados disponíveis.

Para a obtenção de valores V/P e do tipo de calda apropriados para a correta utilização do método GIN foi necessário o recuso a várias metodologias, descritas em detalhe no decorrer do Capítulo 5, criadas especificamente para converter os dados originais para um formato que enviasse menos os resultados a obter. Entre essas adaptações, salienta-se o cálculo de um volume de calda ponderado para contemplar as diferentes formulações A/C utilizadas num mesmo trecho, bem como o cálculo da média das pressões usadas.

Após essa conversão obtiveram-se gráficos V/P que, originalmente, apresentavam uma grande dispersão de valores. Após o estudo individual de cada um desses pontos, foram identificadas as eventuais razões subjacentes ao seu posicionamento, que se sintetizaram num conjunto padrão de situações e resumidas em tabelas. Seguidamente, ao remover da consideração os pontos anómalos justificados, esboçaram-se várias curvas GIN que melhor se adaptassem às representações gráficas remanescentes, sendo selecionada a curva GIN mais apropriada para cada uma das margens das fiadas, bem como os valores limites de pressão e volume, segundo as especificações do método GIN.

É de salientar que, tendo-se tido acesso apenas aos dados originais referentes à finalização das injeções, não foi possível confirmar a veracidade de algumas das conclusões obtidas, sendo para tal necessários dados do maciço virgem ou dos ensaios de injectabilidade realizados antes do início da injeção da cortina.

O resultado final deste processo foi então a obtenção de seis gráficos V/P para cada margem das fiadas F-1, F-2 e F-3 com a respetiva curva GIN. Num caso real, esses gráficos poderiam então ser utilizados para guiar todo o processo de injeção numa determinada cortina de impermeabilização.

Uma das considerações finais mais importantes passa pela ideia de que, no caso da barragem da Apartadura, caso o método GIN já estivesse difundido, talvez tivesse sido uma metodologia mais apropriada de aplicar ao invés da convencional. Isto porque analisando as informações recolhidas e os resultados das injeções realizadas à luz do método GIN e da sua envolvente limite, tendo sempre em consideração as adaptações efetuadas, é possível dizer que:

- Algumas das injeções foram possivelmente continuadas para lá do necessário, em termos de pressões utilizadas, volumes de calda injetados ou, em alguns casos, ambas as situações, apenas para atingir determinados patamares impostos pelos métodos convencionais;
- Admite-se que a litologia do maciço de fundação seria homogénea o suficiente para admitir a utilização de uma calda única, como preconizado por Lombardi e Deere (1993), ter-se-iam possivelmente verificado melhores resultados do que os de todos os diferentes traços de

caldas utilizados, salientando-se no entanto que a cortina efetuada na realidade nunca apresentou quaisquer problemas e ainda hoje se mantém eficiente na sua função;

- A simplificação de todo o processo de injeção, devido à utilização de apenas uma calda, teria sido extremamente útil no caso da barragem da Apartadura, pois todo este processo foi realizado numa área confinada, de dimensões muito reduzidas, a galeria de drenagem.

Para terminar, é possível dizer que o método GIN teria oferecido uma maior simplicidade de processos à execução da cortina de impermeabilização da barragem da Apartadura, que se traduziriam na diminuição do custo da empreitada e na obtenção de uma cortina de pelo menos igual eficiência. Isto não significa, no entanto, que a utilização da metodologia convencional tenha sido uma escolha menos apropriada, tendo na realidade sido a escolha correta aquando da execução do tratamento.

Um desenvolvimento futuro deste tema poderá passar:

- Pelo aprofundamento do conhecimento do método de Silva Gomes (1991), permitindo assim a avaliação do seu funcionamento no âmbito de um caso real de obra;
- Pela realização de um trabalho semelhante ao presente, mas aplicando o método de Wilson e Dreese (1998);
- Pelo desenvolvimento de uma relação mais estreita entre as diferentes metodologias, tornando mais simples a correlação de dados entre elas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Byle, M. J. (1997). Limited Mobility Displacement Grouting: When “Compaction Grout” is NOT Compaction Grout In Vipulanandan C.; American Society of Civil Engineers (eds.), *Grouting: Compaction, Remediation, and Testing, Proceedings of the GeoLogan Session*, 16-18 July, Logan, UT, Geotechnical Special Publication No. 66, pp. 32-42.

Bozovic, A. (1985). Foundation treatment for control of seepage. *Proceedings of the the XV Congress of the International Comission on Large Dams*, Suisse, Lausanne, 367-372 pp.

Bruce, D. A. (1982). Aspects of Rock Grouting Practice on British Dams. *Proceedings of the ASCE Specialty Conference in Grouting in Geotechnical Engineering*, 10-12 February, New Orleans, LA, pp. 301-316.

Bruce, D. A. (1992). Drilling and Grouting Techniques for Dam Rehabilitation. *Proceedings from the ASDSO 9th Annual Conference*, 13-16 September, Baltimore, MD, pp. 85-96.

Bruce, D. A. (1993). A Review of Drilling and Grouting Methods for Existing Embankment Dams. *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation*, 25-28 April, N.C. State University, Raleigh, N.C., pp. 803-819.

Bruce, D. A. (1994). Permeation Grouting. Chap. 2 In Xanthakos, P.; Abramson, L.; Bruce, D. (eds) *Ground Improvement and Control*, New York: John Wiley & Sons, Inc. pp. 536–537.

Bruce, D. A. (2003). The Basics of Drilling for Specialty Geotechnical Construction Processes. In Johnsen, L. F.; Bruce, D. A.; Byle, M. J.; American Society of Civil Engineers (eds.), *Grouting and Ground Treatment, Proceedings of the Third International Conference*, 10-12 February, New Orleans, LA, Geotechnical Special Publication No.120, pp. 752-771.

Bruce, D. A. (2011). Rock Grouting for Dams and the Need to Fight Regressive Thinking. *Proceedings of the United States Society on Dams Conference*, 12-13 April, San Diego, CA, 16 p.

Bruce, D. A.; Croxall, J. E. (1989). The MPSP Grouting System: A New Application for Raise Boring. *Proceedings of the 2nd International Conference on Foundations and Tunnels*, 19-21 September, London, pp. 331-340.

Bruce, D. A. ; Davis, J. P. (2005). Drilling through Embankments: The State of Practice. *Proceedings of the United States Society on Dams Conference*, 6-10 June, Salt Lake City, UT, 12 p.

Bruce, D. A.; Dreese, T. L. (2010). Specifications for Rock Mass Grouting. *Proceedings of the Association of State Dam Safety Officials Dam Safety Conference*, 19-23 September, Seattle, WA, 12 p.

Bruce, D. A.; Dreese, T. L.; Heenan, D. M. (2008). Concrete Walls and Grout Curtains in the Twenty-First Century: The Concept of Composite Cut-Offs for Seepage Control. *Proceedings of the United States Society on Dams Conference*, 22 April - 8 May, Portland, OR, 35 p.

Bruce, D. A.; Dreese, T. L.; Wilson, D. B. (2009). Design, Construction and Performance of Seepage Barriers for Dams on Carbonate Foundations, *Proceedings of the United States Society on Dams Annual Conference*, 20-24 April, Nashville, TN, 16 p.

Bruce, D. A.; Gallavresi, F. (1988). The MPSP System: A New Method of Grouting Difficult Rock Formations. *Proceedings of the ASCE Conference*, May, Nashville, TN, 19 p.

Bruce, D. A.; Heenan, D. M.; Wilson, D. B. (2005). Quality and Quantification in Rock Drilling and Grouting. *Proceedings of Sessions of the Geo-Frontiers Congress*, 24–26 January, Austin, Texas, 10 p.

Bruce, D. A.; Littlejohn G. S.; Naudts A. (1997). Grouting Materials for Ground Treatment: A Practitioner's Guide. In Vipulanandan C.; American Society of Civil Engineers (eds.), *Grouting: Compaction, Remediation, and Testing, Proceedings of the GeoLogan Session*, 16-18 July, Logan, UT, Geotechnical Special Publication No. 66, pp. 306-334.

Bruce, D. A.; Naudts A.; Gause, C. (1999). Rock Grouting: Contemporary Concepts in Materials, Methods, and Verification. *GeoEngineering for Underground Facilities: Proceedings of the 3rd National Conference of the Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers*, 13-17 June, Champaign, IL, Geotechnical Special Publication No. 90, pp. 936-949.

Bussey, W. H. (1973). Suspension Grouts and Their Injection. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 4 (vol.10), pp. 313–323.

Carvalho, E. C. (2007). Anexo Nacional do Eurocódigo 8 - Consequências para o dimensionamento sísmico em Portugal. 7º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Setembro (policopiado).

Carvalho, M. M. M. (1992). *Tratamento por injeções de caldas de cimento de fundações rochosas de barragens de aterro*. Dissertação de Mestrado em Geologia de Engenharia. FCT-UNL, Lisboa, 156 p.

Chuaqui, M. (2006). How many components in a grout mix?. *Geotechnical News-Grout Line*, 4 (vol.24), 52-57 pp.

Chuaqui, M.; Bruce, D. A. (2003). Mix Design and Quality Control Procedures for High Mobility Cement Based Grouts. In Johnsen, L. F.; Bruce, D. A.; Byle, M. J.; American Society of Civil Engineers (eds.), *Grouting and Ground Treatment, Proceedings of the Third International Conference*, 10-12 February, New Orleans, LA, Geotechnical Special Publication No.120, pp. 1153-1168.

Corven, J.; Moreton, A. (2004). Post-Tensioning Tendon Instalation and Grouting Manual. Florida, U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 172 pp.

Deere, D. U. (1976). Dams on Rock Foundations - Some Design Questions. In American Society of Civil Engineers (eds.), *Rock Engineering for Foundations and Slopes Conference II*, 15-18 August, Boulder, CO, pp. 55-86.

Deere, D. U. (1982). Cement-Bentonite Grouting For Dams. *Proceedings of the ASCE Specialty Conference in Grouting in Geotechnical Engineering*, 10-12 February, New Orleans, LA, pp. 279-300.

DePaoli, B.; Bosco, B.; Granata, R.; Bruce, D. A. (1992). Fundamental Observations on Cement Based Grouts: Traditional Materials. In Borden, R. H.; Holtz, R. D.; Juran, I.; American Society of Civil Engineers (eds.), *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics: Proceedings of the Conference*, 25-28 February, New Orleans, LA, pp. 474-485.

Ewert, F. K. (1985). *Rock Grouting with Emphasis on Dam Sites*. Berlin: Springer-Verlag, 428 p.

Ewert, F. K. (2003). Discussion of Rock Type Related Criteria for Curtain Grouting. *Proceedings of the Third International Conference on Grouting and Ground Improvement*, Reston, VA. ASCE Special Publication No. 120 (policopiado).

Fell, R.; MacGregor, P.; Stapledon, D.; Bell, G. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams*. Rotterdam, A. A. Balkema, 912 p.

Glossop, R. (1960). The invention and development of injection processes. Part I: 1802-1850. *Geotechnique*, 3 (vol.10), pp. 91-100.

Glossop, R. (1961). The invention and development of injection processes. Part II: 1850-1960. *Geotechnique*, 4 (vol.11), pp.255-279.

Gonzalez, J. V.; Rodrigues, S. F. (1988). Bituminous Concrete Faced Rockfill Dam: A Portuguese Case. *Proceedings of the Seizième Congrès des Grands Barrages*, San Francisco, 745-757 pp.

Goodman, R. (1980). *Introduction to Rock Mechanics, First Edition*. New York, J. Wiley & Sons, pp. 32-34.

Houlsby, A. C. (1976). Routine interpretation of the Lugeon Water-test. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 4 (vol.9), pp. 303-313.

Houlsby, A. C. (1977). Engineering of grout curtains to standards. *Journal of the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers*, 9, pp. 953-970.

Houlsby, A. C. (1982). Optimum Water Cement Ratios for Rock Grouting. *Proceedings of the ASCE Specialty Conference in Grouting in Geotechnical Engineering*, 10-12 February, New Orleans (policopiado).

Houlsby, A. C. (1985). Cement Grouting: Water Minimising Practices. In Baker, W. H., American Society of Civil Engineers (eds.), *Issues in Dam Grouting*, 30 April, Denver, pp. 34-75.

Houlsby, A. C. (1990). *Construction and Design of Cement Grouting*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 468 p.

IPQ (2001). NP EN 197-1: Composição, especificações, e critérios de conformidade para cimentos correntes., 36 p.

IPQ (2010). EN 1998-1. Eurocódigo 8. Projeto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1 – Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios., 35-45 pp.

Kutzner, C. (1996). *Grouting of Rock and Soil*. Rotterdam, A. A. Balkema, 271 p.

Littlejohn, G. S. (1982). Design of Cement Based Grouts. *Proceedings of the ASCE Specialty Conference in Grouting in Geotechnical Engineering*, 10-12 February, New Orleans, pp. 35-48.

Londe, P.; Le May, Y. (1993). *Fondations rocheuses de barrages*. Paris, International Commission on Large Dams, 78 p.

Lombardi, G. (1985). The role of cohesion in cement grouting of rock. *Proceedings of the CIGB, Quinzième Congrès des Grands Barrages*, Lausanne, Suisse, pp. 235-261.

Lombardi, G. (1996). Selecting the grouting intensity. *International Water Power & Dam Construction*, 4 (vol.3), pp. 62-66.

Lombardi, G. (1997). GIN principle revisited. *International Water Power & Dam Construction*, pp.33-36.

Lombardi, G. (1999). Grouting of rock with cement mixes. *Proceedings of the ICOLD Symposium: Dam Foundations: Problems and Solutions*, Antalya, Turkey, 18 p.

- Lombardi, G. (2003). Grouting of rock masses. In L. F. Johnsen, D. A. Bruce, and M. J. Byle, American Society of Civil Engineers (eds.), *Grouting and Ground Treatment, Proceedings of the Third International Conference*. 10-12 February, New Orleans, LA, Geotechnical Special Publication No.120, pp. 164-197.
- Lombardi, G. (2007). GIN again misunderstood. *Geotechnical News-Grout Line*, 2 (vol.25), pp. 35-37.
- Lombardi, G. (2008). Misunderstanding of GIN Confirmed. *Geotechnical News-Grout Line*, 2 (vol. 26), pp.3-10.
- Lombardi, G.; Deere, D. U. (1985). Grout slurries thick or thin?. In Baker, W. H., American Society of Civil Engineers (eds.), *Issues in Dam Grouting*, 30 April, Denver, pp. 156-164.
- Lombardi, G.; Deere, D. U. (1993). Grouting design and control using the GIN principle. *International Water Power & Dam Construction*, pp. 15-22.
- Mitchell, J. K. (1981). State of the Art - Soil Improvement. *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Stockholm, Sweden, pp. 509-565.
- Multiurethanes (2010). *Technical Information – Grouting Narrow Fissures*. Consultado a 13 de Janeiro de 2012 em: <http://www.multiurethanes.com/images/Multiurethanes-Technical-Information-Cement-Grouting-4.pdf>
- Nonveiller, E. (1968). Grouted Cutoff Curtains in Fissured Rock. *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*. Madrid, Spain, pp. 389–400.
- Nonveiller, E. (1970). A rational approach to the design of grout curtains. *Proceedings of the 2nd International Congress on Rock Mechanics*. Belgrade, Serbia, pp. 217-222.
- Oliveira, R. (1983). Estudo Geotécnico de Maciços Rochosos de Fundação de Barragens. Contribuição da Geologia de Engenharia. Programa de Investigação LNEC, Lisboa (policopiado).
- Quiñones-Rozo, C. (2010). Lugeon Test Interpretation Revisited. *Proceedings of the 30th Annual USSD Conference*, 12-16 April, Sacramento, CA, pp. 405-414.
- Ramos, S. M. R (1995). *Métodos e técnicas de injeção de fundações rochosas de barragens de aterro*. Dissertação de Mestrado em Geologia de Engenharia. FCT-UNL, Lisboa, 148 p.
- Raposo, E. M. S. (2011). *Observação de deslocamentos em obras geotécnicas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia). FCT-UNL, Lisboa, 117 p.

Sims, G.P.; Rainey, T. P. (1985). Gitaru Dam grouting. *Proceedings of the the XV Congress of the International Comission on Large Dams*, Suisse, Lausanne, pp. 1143–1166.

Silva Gomes, A. (1991). Controlo de qualidade do tratamento por injeções de fundações rochosas de barragens de aterro. LNEC. Lisboa, 153 p.

Silva Gomes, A. (1991). Ensaios de permeabilidade em maciços rochosos. LNEC. Lisboa.

Silva Gomes, A. (1993). Complemento do plano em observação da barragem da Apartadura. Lisboa

Silva Gomes, A. (1993). Quality control of a rockfill dam foundation treatment. In Widmann, R.(ed.) *Grouting in Rock and Concrete: Proceedings of the International Conference on Grouting in Rock and Concrete*, 11-12 October, Salzburg, Austria, 331-340 pp.

Silva Gomes, A. (2002). Sistemas de observação em obras geotécnicas. Planeamento, instalação e observação. *Proceedings do 8º Congresso Nacional de Geotecnia*, 15-18 Abril, Lisboa, pp. 2541-2562.

Silva Gomes, A. (2012). Informação oral. FCT-UNL, Monte de Caparica.

Silva Gomes, A.; Ramos, S. (1995). Análise de resultados obtidos na rede piezométrica instalada na fundação da barragem da Apartadura. *Proceedings do 5º Congresso Nacional de Geotecnia*. Abril, Coimbra, pp.105-120.

Terzaghi, K.; Peck, R.; Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice, Third Edition*. New York, J. Wiley & Sons., 592 p.

USACE (1984). EM 1110-2-3506, Engineering and Design, Grouting Technology, 159 p.

Warner, J. (2004). *Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock and Structures*, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 632 p.

Wilson, D. B.; Dreese, T. L. (1998) Grouting Technologies for Dam Foundations, *Proceedings of the Annual Conference of the Association of State Dam Safety Officials*, Las Vegas, Nevada, 11-14 October (policopiado).

Wilson, D. B.; Dreese, T.L. (2003). Quantitatively engineered grout curtains. In L. F. Johnsen, D. A. Bruce, and M. J. Byle, American Society of Civil Engineers (eds.), *Grouting and Ground Treatment, Proceedings of the Third International Conference*, 10-12 February, New Orleans, LA, Geotechnical Special Publication No.120, pp. 881-892.

Weaver, K. D. (1991). *Dam Foundation Grouting*, New York, American Society of Civil Engineers, ASCE Press, 178 p.

Weaver, K. D. (2000). A Critical look at Use of “Rules of Thumb” for Selection of Grout Injection Pressures. In Krizek, R. J.; Sharp, K.; ASCE (eds.), *Advances in Grouting and Ground Modification: Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000*, 5-8 August, Denver, CO, Geotechnical Special Publication No.104, pp. 173-180.

Weaver, K. D.; Bruce, D. A. (2007). *Dam Foundation Grouting, Revised and Expanded Edition*, New York, American Society of Civil Engineers, ASCE Press, 504 p.

Xanthakos, P.; Abramson, L.; Bruce, D. (1994). *Ground Improvement and Control*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 945 p.

ANEXOS

ANEXO 1 – DADOS V/P PROCESSADOS

Fiada F-1

	“MARGEM DIREITA”																									
Furos	E 1.1		E 1.2		E 1.3		E 1.4		E 1.5		E 1.6		E 1.7		E 1.9		E 1.11		E 1.13		E 1.15		E 1.17		E 1.19	
Trechos	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M
0-3	55	200	111	200	166	173	204	173	111	200	204	173	473	159	332	200	387	200	295	200	332	200	442	200	442	200
3-8	66	400	100	400	134	346	156	346	66	400	114	245	199	400	66	400	419	363	149	283	186	288	133	400	201	346
8-13	50	600	62	490	25	600	41	600	50	600	50	400	199	600	41	600	749	493	11	200	13	400	66	600	133	400
13-18	50	600	62	490	25	600	41	600	19	600	33	1000	849	710	41	600	155	447	11	200	9	573	44	1000	66	1000
18-23	50	600	62	490	25	600	41	600	50	600	33	1000	100	1000	41	600	155	447	11	200	13	400	44	1000	83	1000
23-28	50	600	62	490	25	600	41	600	50	600	33	1000	133	1000	41	600	155	447	11	200	13	400	44	1000	83	1000

"MARGEM ESQUERDA"																						
Furos	E 1.1		E 1.2		E 1.3		E 1.4		E 1.5		E 1.6		E 1.8		E 1.10		E 1.12		E 1.14		E 1.16	
Trechos	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M
0-3	55	200	111	200	166	173	204	173	111	200	204	173	211	173	539	173	166	200	111	200	221	200
3-8	66	400	100	400	134	346	156	346	66	400	114	245	116	245	175	245	100	400	100	400	66	400
8-13	50	600	62	490	25	600	41	600	50	600	50	400	25	600	33	600	100	600	25	600	133	600
13-18	50	600	62	490	25	600	41	600	19	600	33	1000	25	600	33	600	44	1000	25	600	44	1000
18-23	50	600	62	490	25	600	41	600	50	600	33	1000	25	600	33	600	44	1000	25	600	44	1000
23-28	50	600	62	490	25	600	41	600	50	600	33	1000	25	600	33	600	44	1000	25	600	44	1000



Furos primários



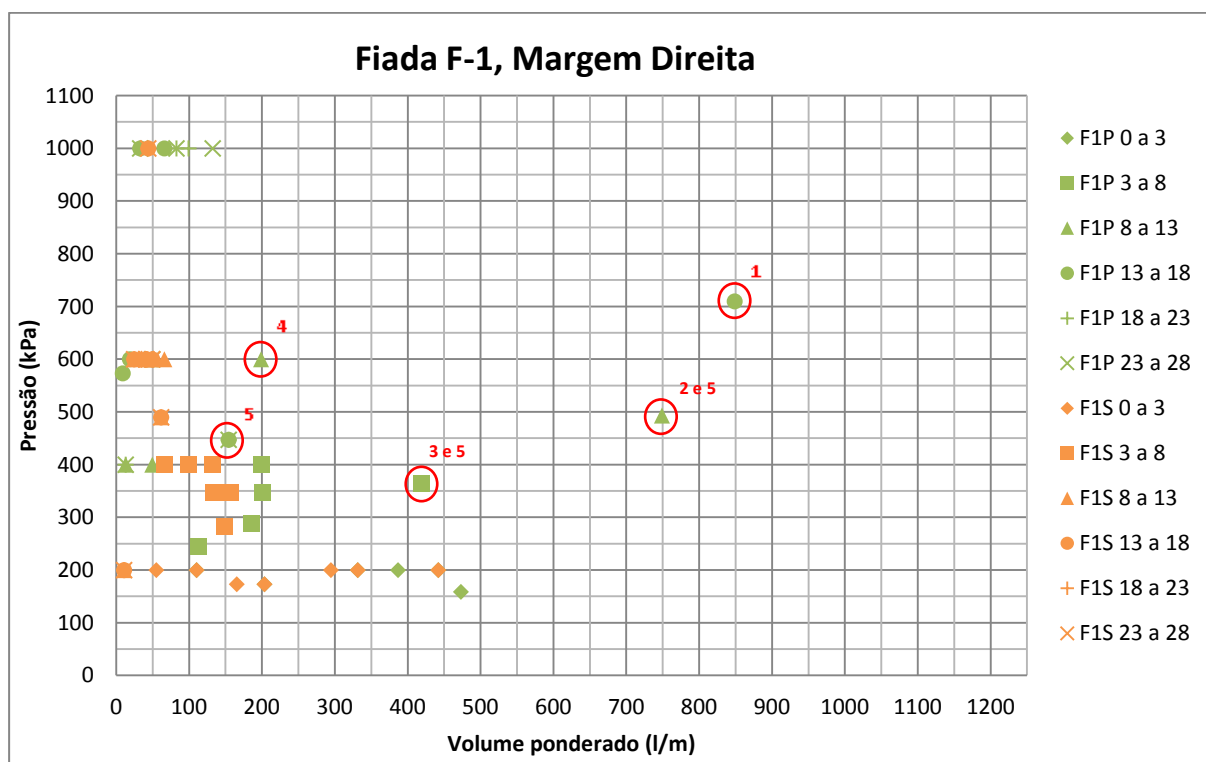
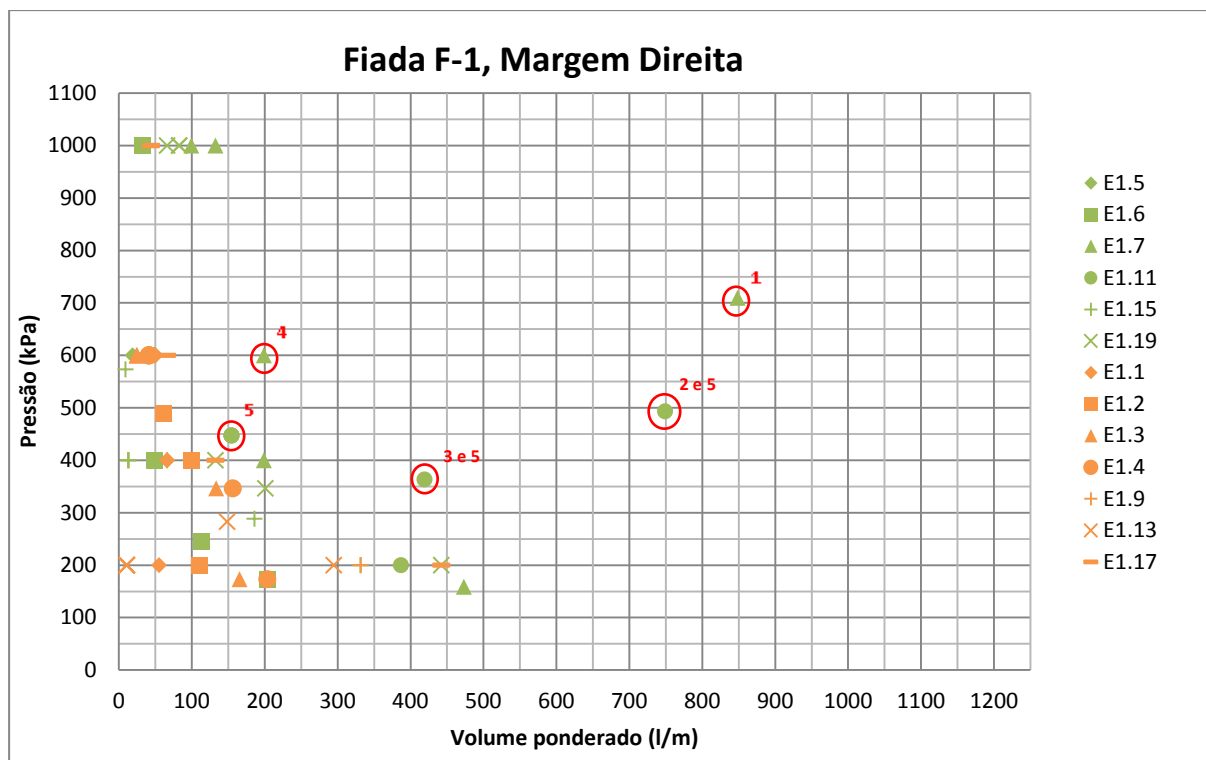
Furos secundários

Fiada F-2

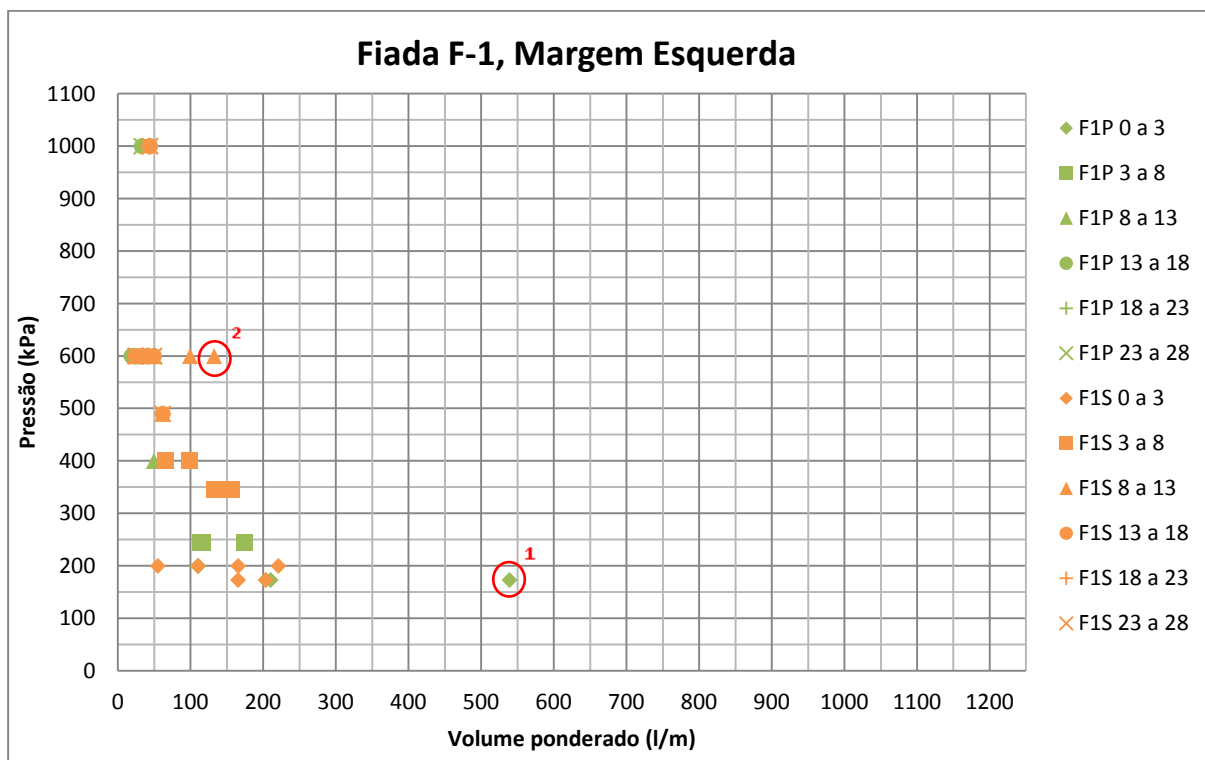
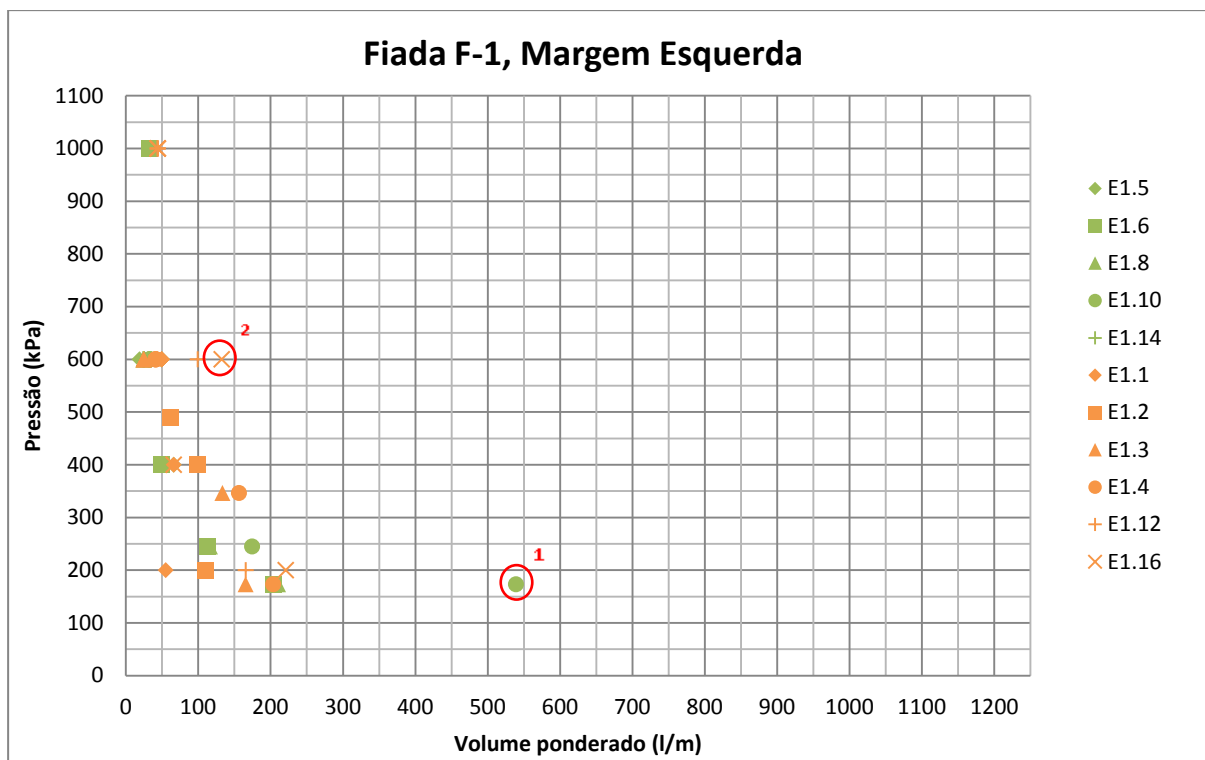
"MARGEM DIREITA"																						
Furos	E 2.3		E 2.4		E 2.5		E 2.7		E 2.9		E 2.11		E 2.13		E 2.15		E 2.16		E 2.17		E 2.19	
Trechos	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M
0-3	111	300	166	300	111	300	83	200	55	200	957	164	111	200	55	300	55	300	111	200	35	200
3-8	384	600	50	600	66	300	50	200	33	200	574	164	232	400	33	300	100	600	66	400	21	200
8-13	33	800	50	600	166	800	199	600	66	600	28	600	33	600	193	505	25	800	66	400	21	200
13-18	33	800	33	1000	21	1000	89	1000	66	1000	111	229	33	600	193	505	25	800	92	837	21	200
18-23	33	800	33	1000	55	1000	22	1000	66	1000	59	141	33	600	193	505	25	800	92	837	21	200
23-28	33	800	33	1000	55	1000	22	1000	66	1000	111	229	407	447	193	505	25	800	92	837	21	200

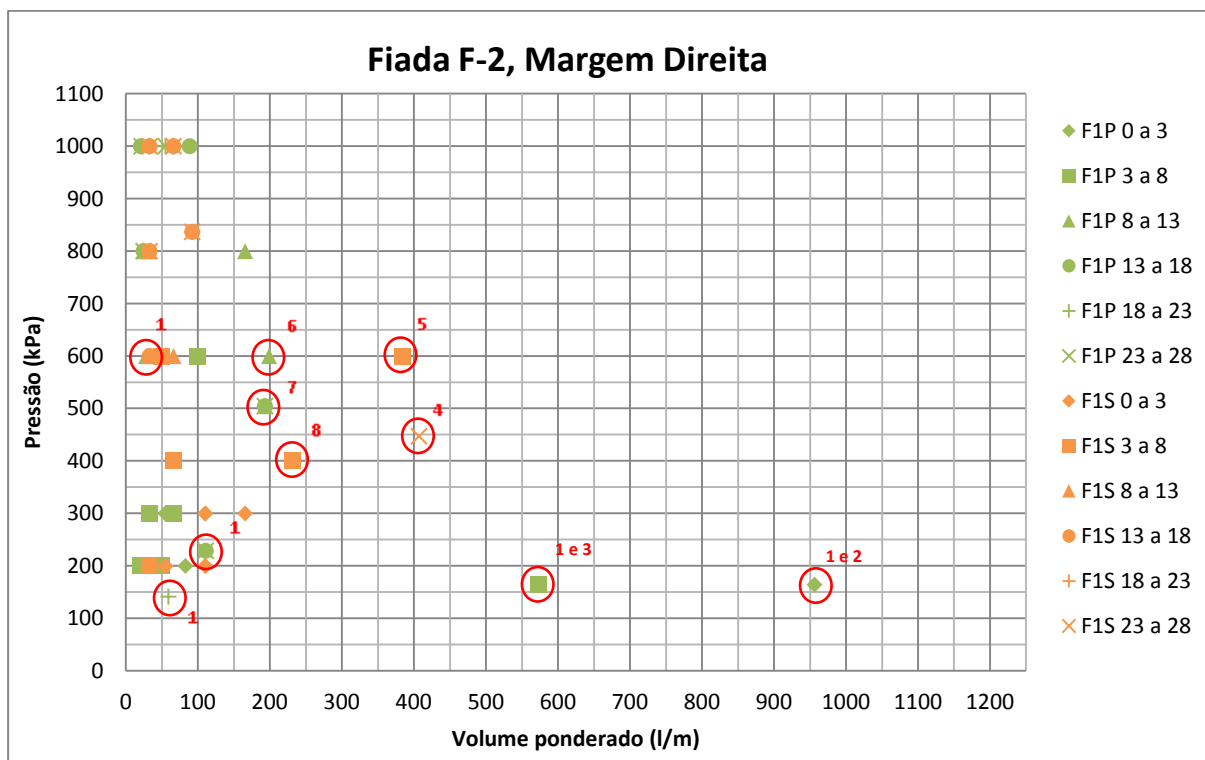
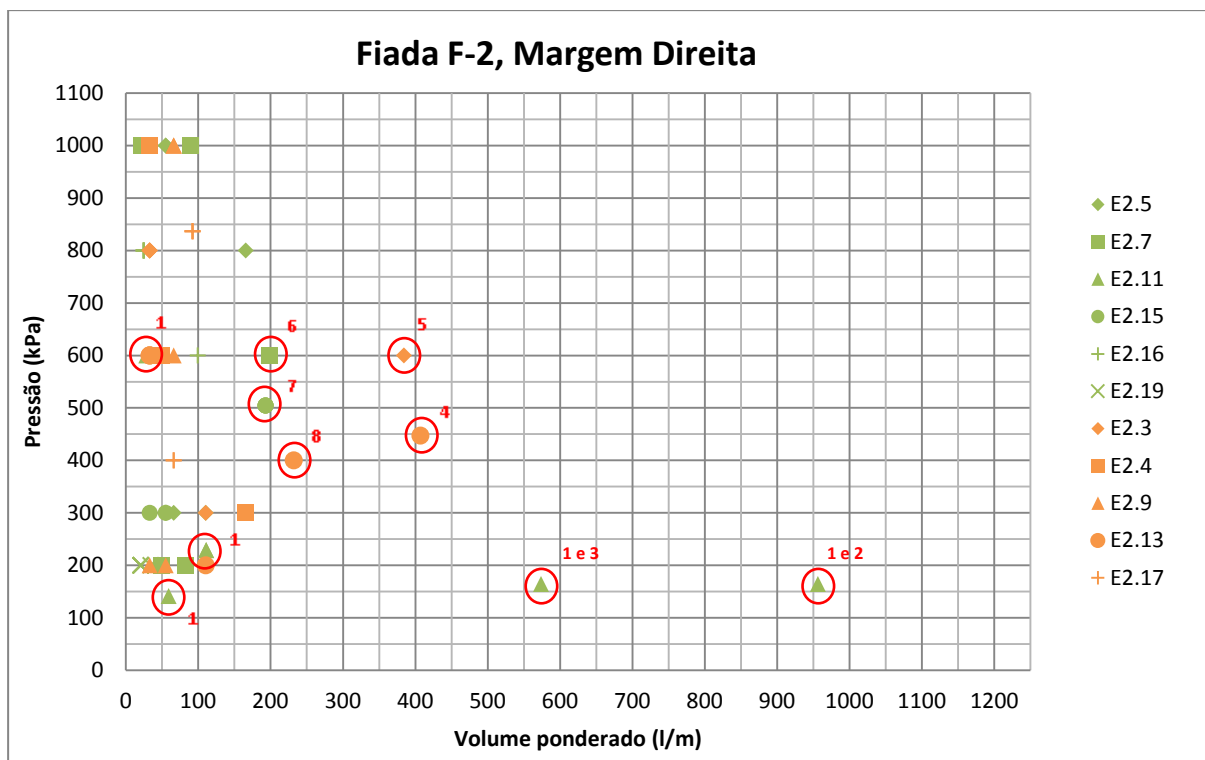
	“MARGEM ESQUERDA”																			
Furos	E 2.1		E 2.2		E 2.3		E 2.4		E 2.5		E 2.6		E 2.8		E 2.10		E 2.12		E 2.14	
Trechos	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M	V _P	P _M
0-3	111	300	55	300	111	300	166	300	111	300	16	300	83	300	166	300	111	300	111	300
3-8	33	600	33	300	384	600	50	600	66	300	9	300	50	300	199	600	66	600	218	548
8-13	33	600	33	300	33	800	50	600	166	800	9	300	25	800	131	732	100	800	218	548
13-18	33	1000	33	300	33	800	33	1000	21	1000	9	300	25	800	131	732	66	1000	33	1000
18-23	33	1000	33	300	33	800	33	1000	55	1000	9	300	25	800	131	732	66	1000	33	1000
23-28	33	1000	33	300	33	800	33	1000	55	1000	9	300	25	800	131	732	66	1000	33	1000

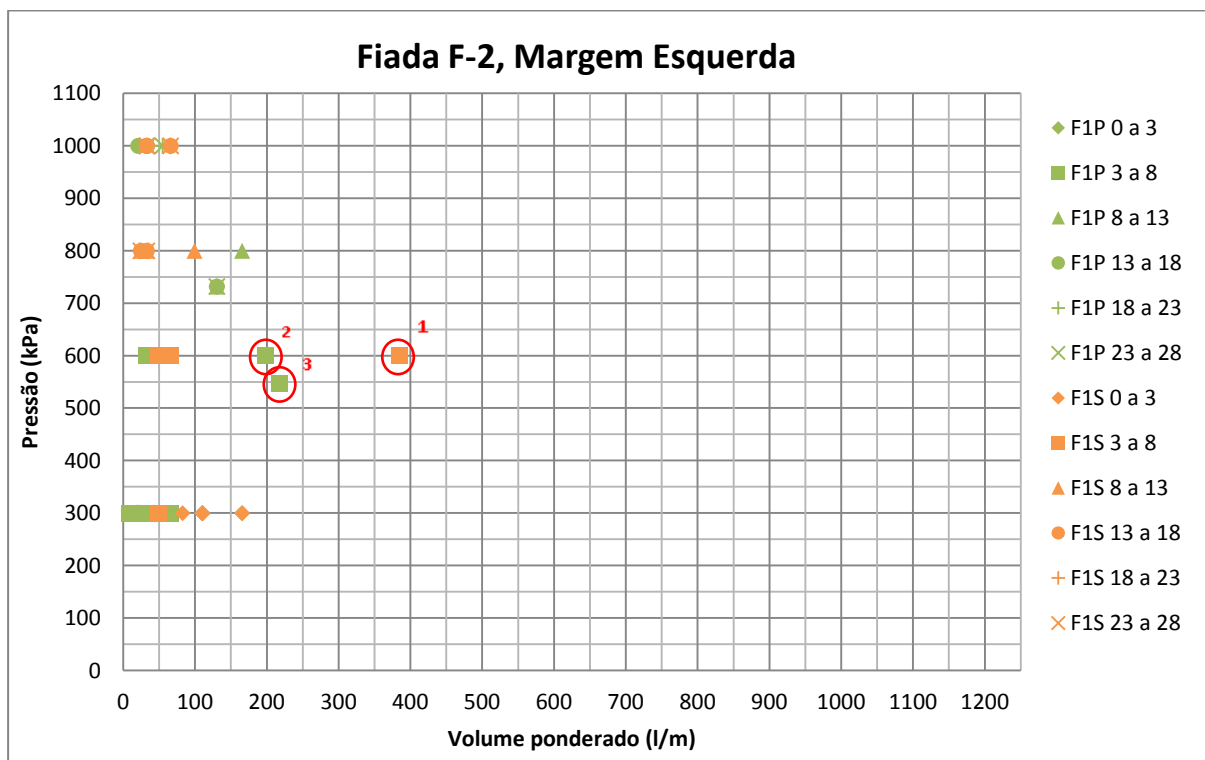
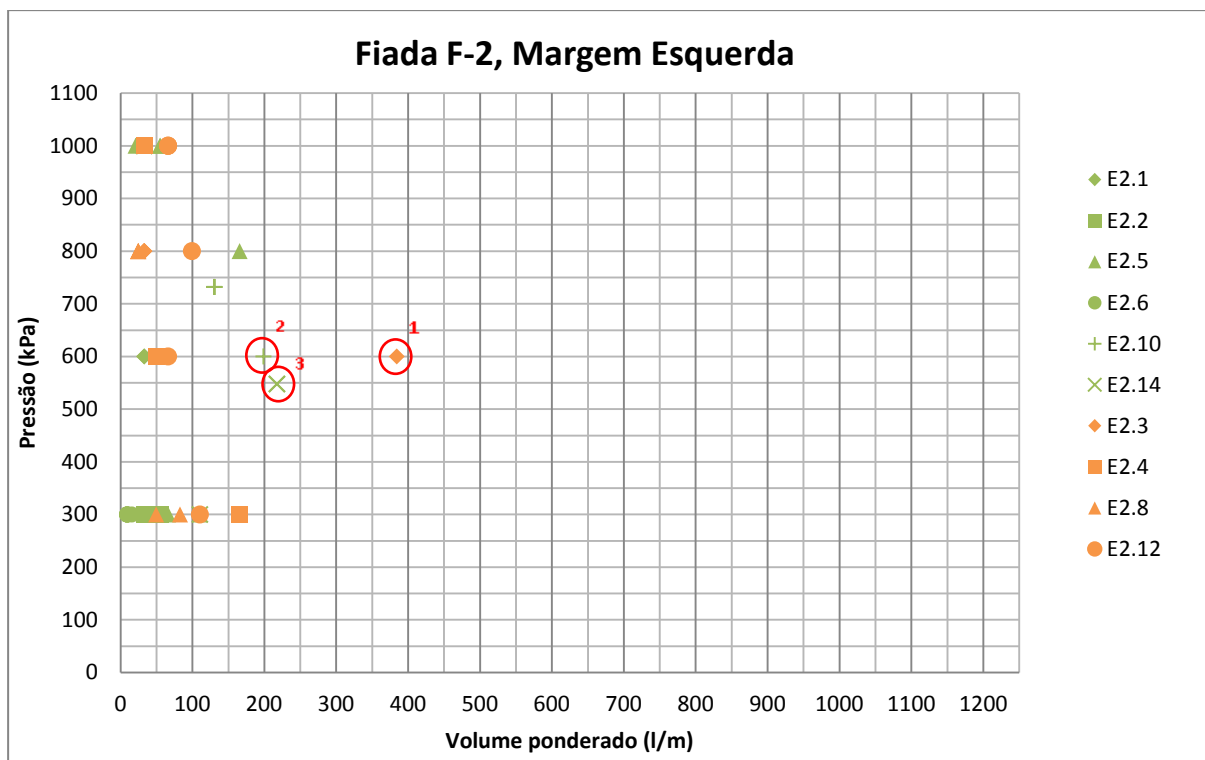
ANEXO 2 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS DADOS V/P

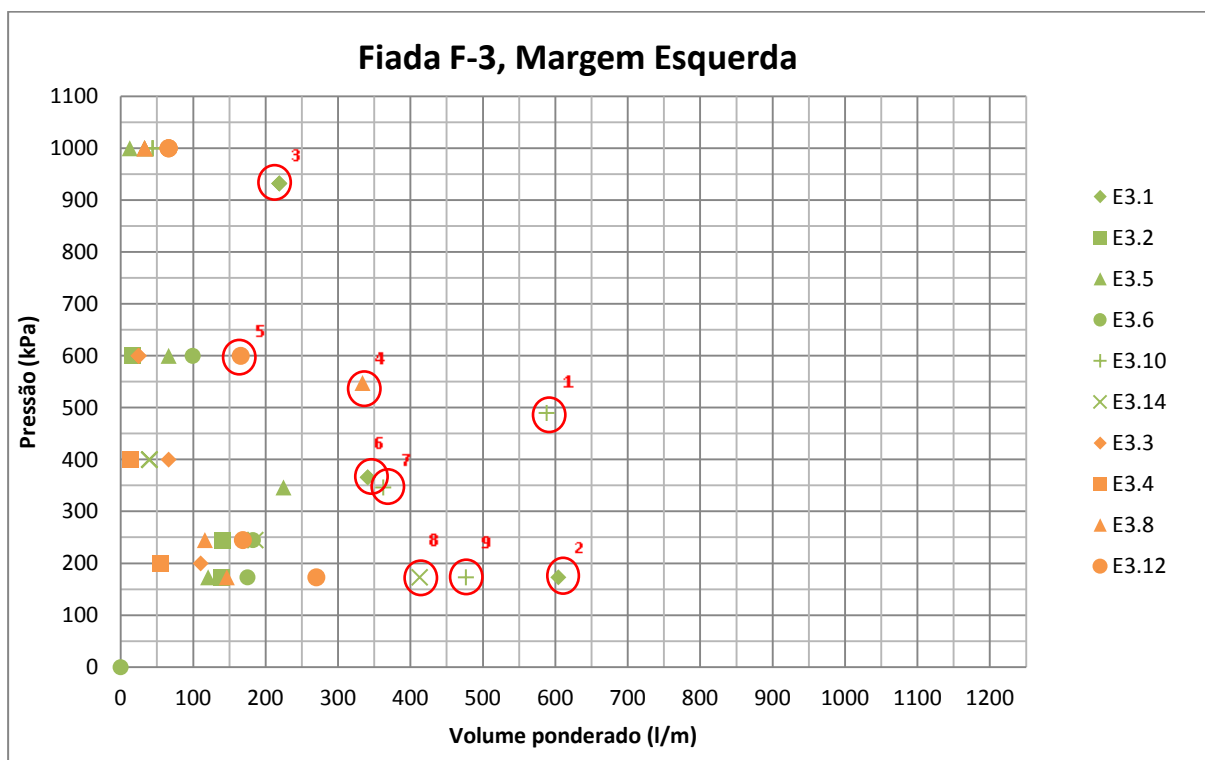
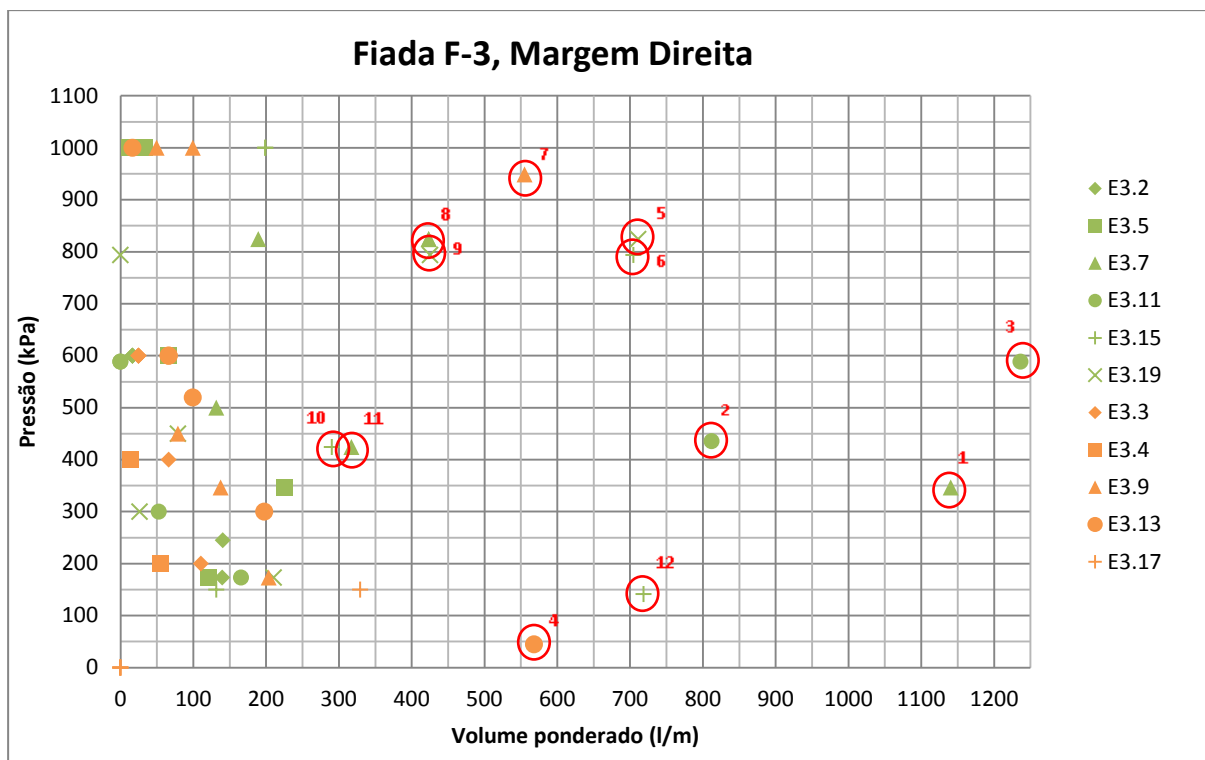


○ - Outliers



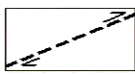
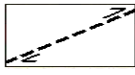

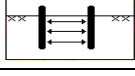




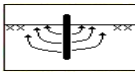



ANEXO 3 – OUTLIERS E SUA JUSTIFICAÇÃO

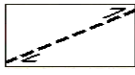
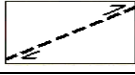
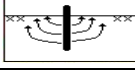

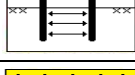


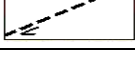
FIADA F-1, MARGEM DIREITA

Ponto nº	Furo	Trecho(s)	Ordem	Valores		Causa provável	Observações
				V _m (l/m)	P _m (kPa)		
4	E 1.7	8 - 13	P	199	600		
1	E 1.7	13 - 18	P	849	710		Falha F-2
3	E 1.11	3 - 8	P	419	363		Falha F-2
2	E 1.11	8 - 13	P	749	493		
5	E 1.11	0 - 28	P	-	-		Comunica com furo E 2.11

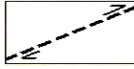
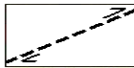
FIADA F-1, MARGEM ESQUERDA

Ponto nº	Furo	Trecho(s)	Ordem	Valores		Causa provável	Observações
				V _m (l/m)	P _m (kPa)		
1	E 1.10	0 - 3	P	539	173		
2	E 1.16	8 - 13	S	133	600		

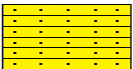


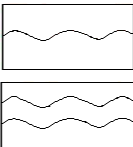
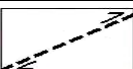

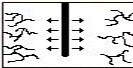
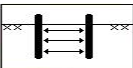
FIADA F-2, MARGEM DIREITA

Ponto nº	Furo	Trecho(s)	Ordem	Valores		Causa provável	Observações
				V _m (l/m)	P _m (kPa)		
5	E 2.3	3 - 8	S	384	600		Falha F-2
6	E 2.7	8 - 13	P	199	600		Falha F-2
2	E 2.11	0 - 3	P	957	164		
3	E 2.11	3 - 8	P	574	164		Falha F-2
1	E 2.11	0 - 28	P	-	-		Comunica com furo E 1.11
8	E 2.13	3 - 8	S	232	400		
4	E 2.13	23 - 28	S	407	447		Falha F-3
7	E 2.15	8 - 28	P	193	505		Falha F-3 no último trecho

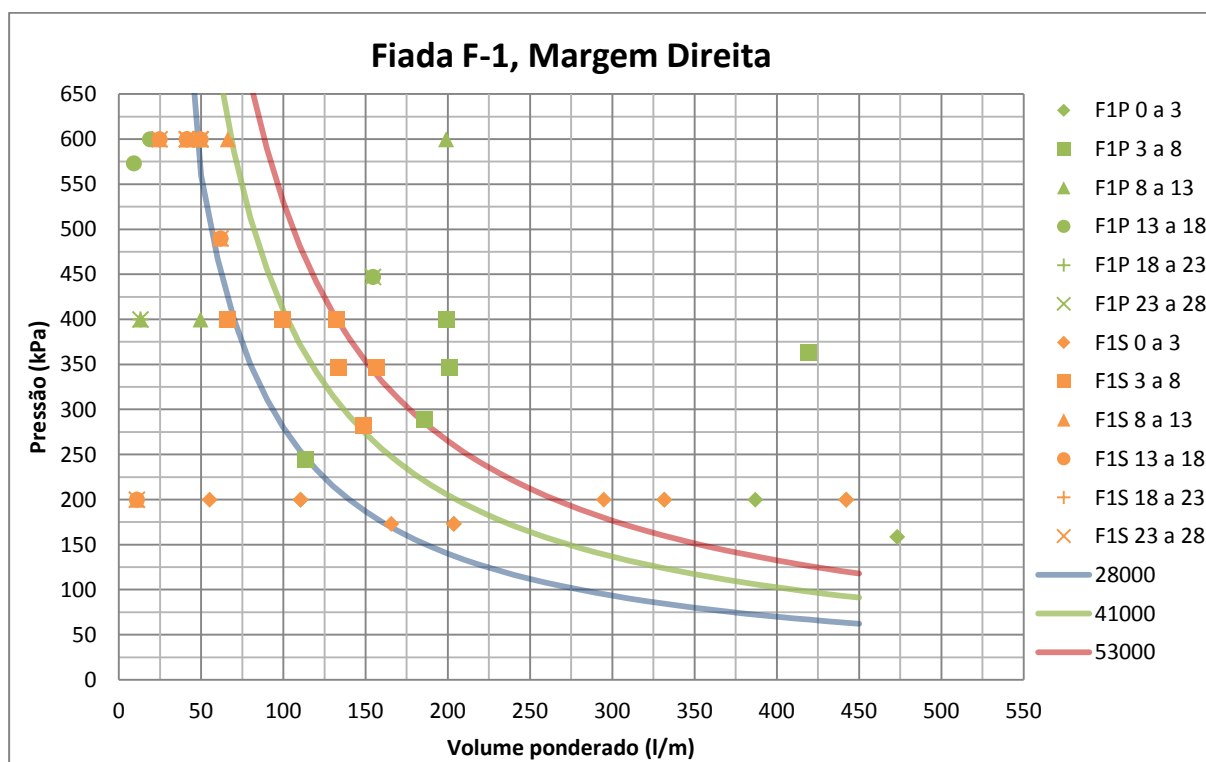
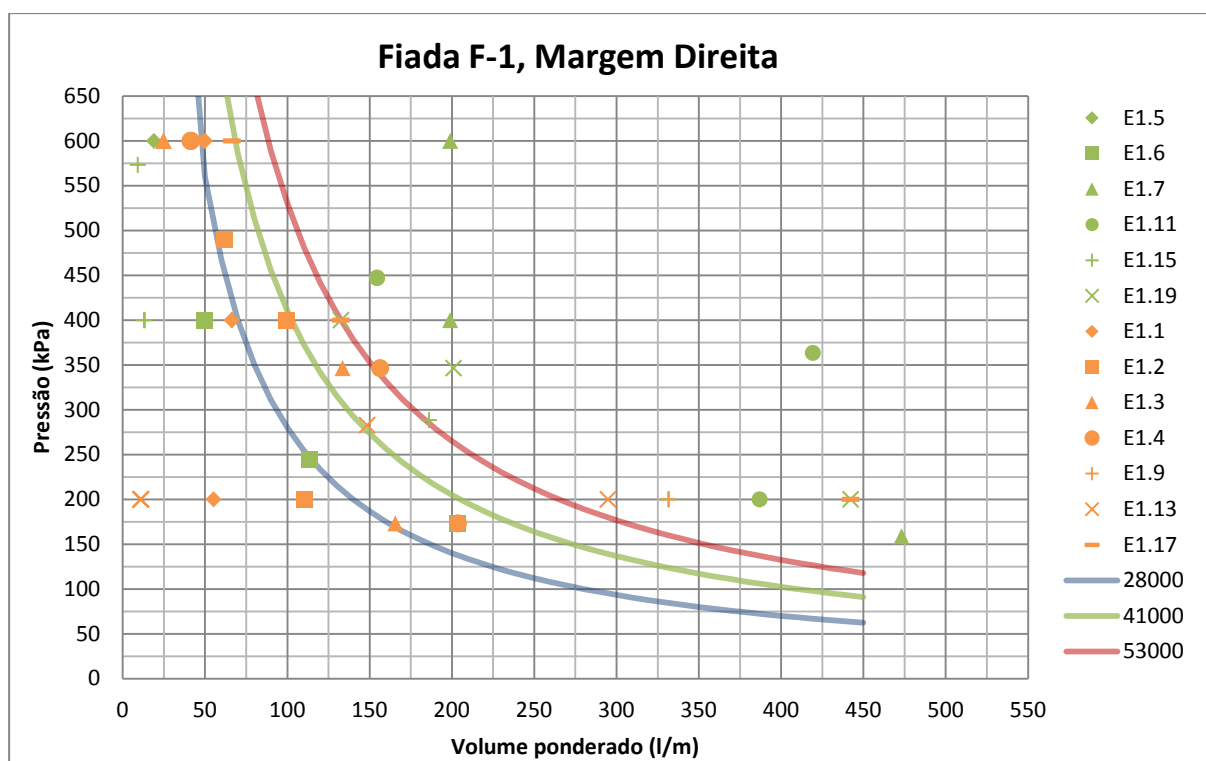
FIADA F-2, MARGEM ESQUERDA

Ponto nº	Furo	Trecho(s)	Ordem	Valores		Causa provável	Observações
				V _m (l/m)	P _m (kPa)		
1	E 2.3	3 - 8	S	384	600		Falha F-4
2	E 2.10	3 - 8	P	199	600		Zona de esmagamento
3	E 2.14	3 - 13	P	218	548	Furo não vedou	

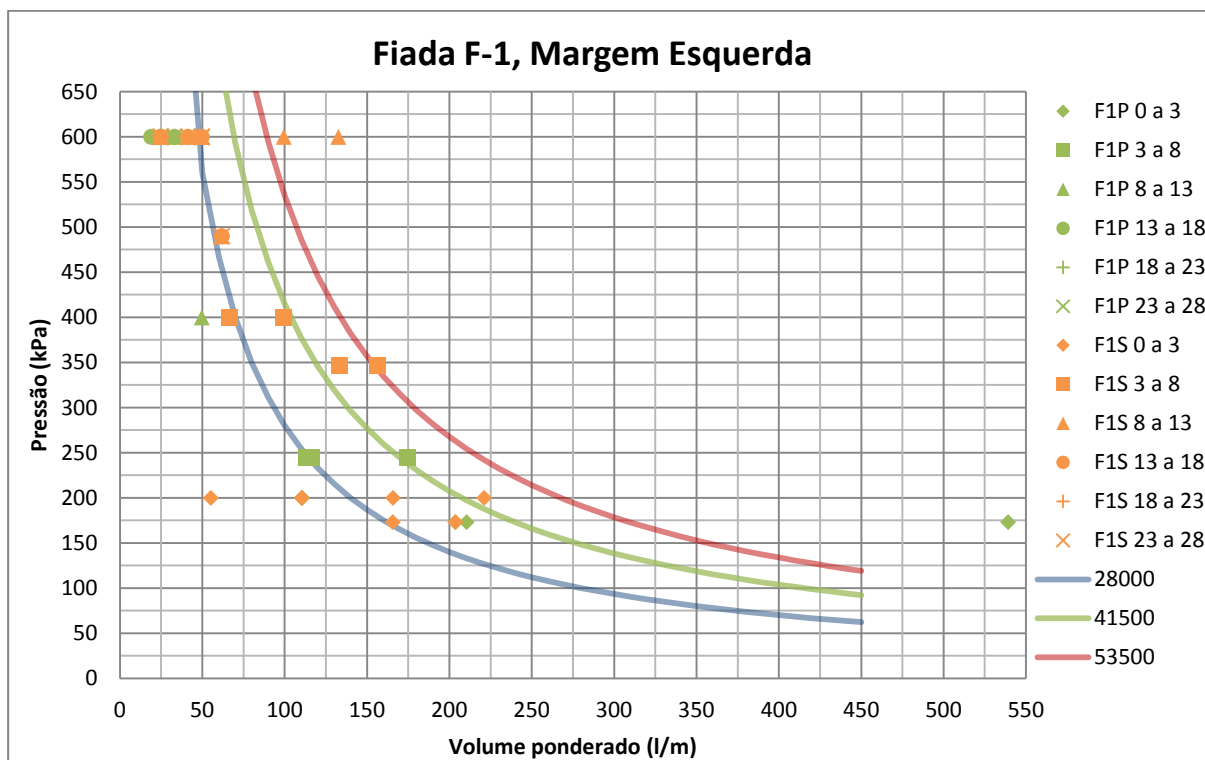
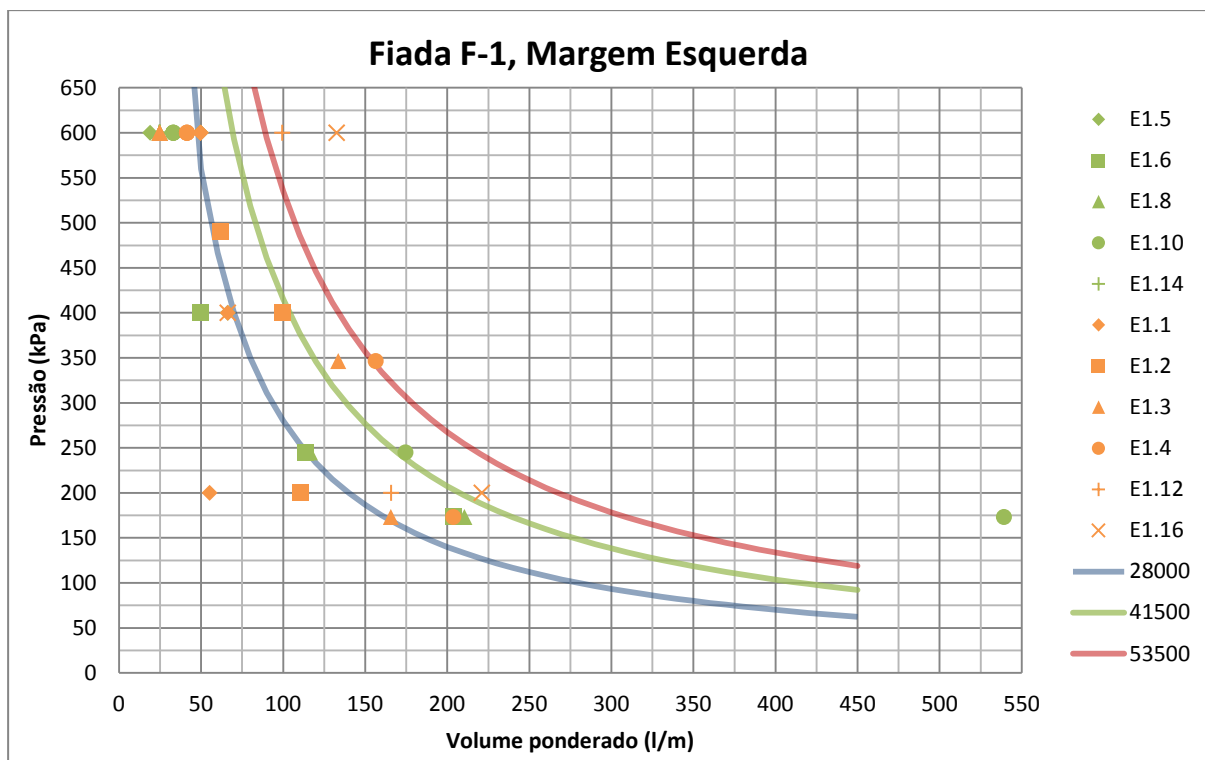
LEGENDA

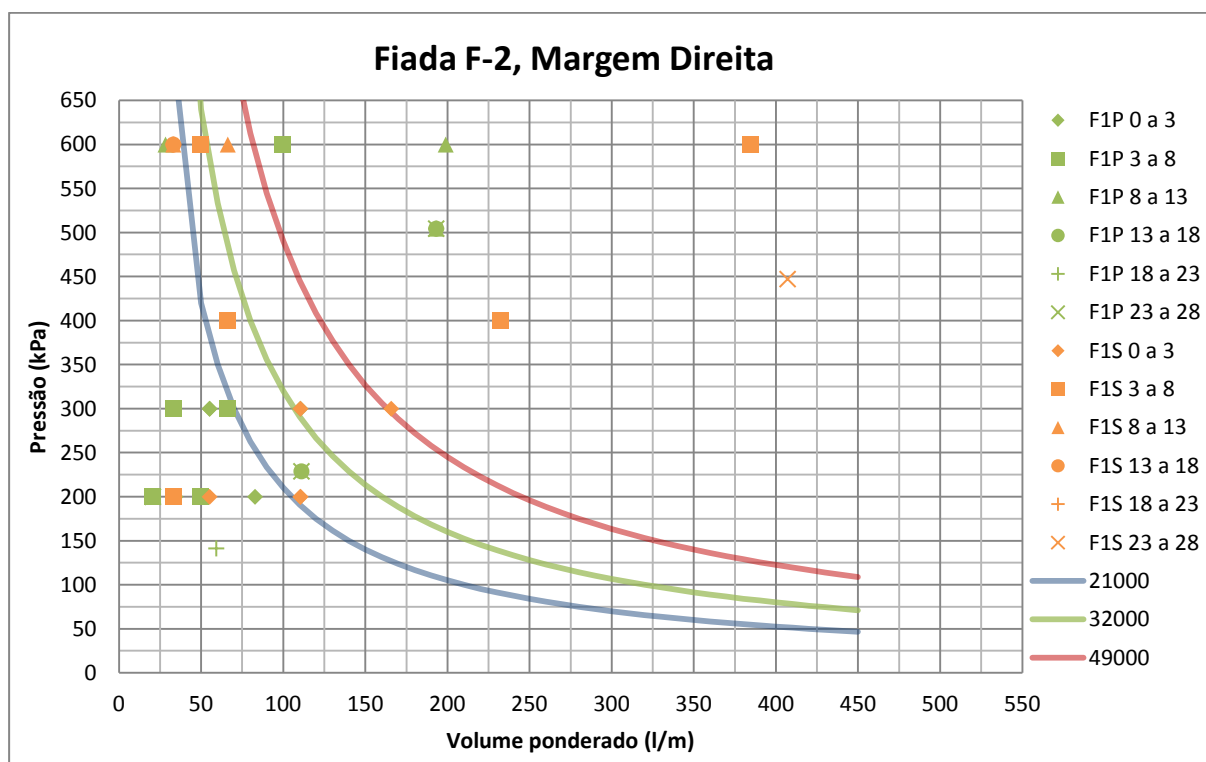
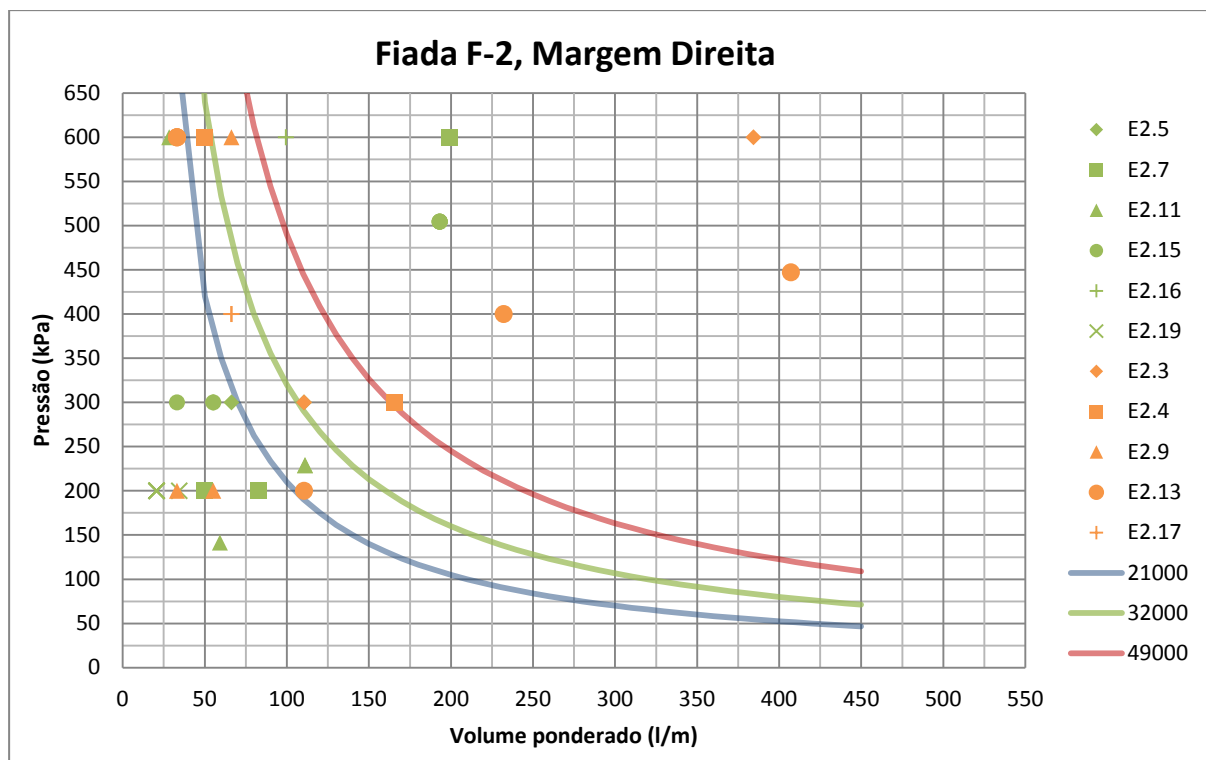
Símbolo	Descrição
	Quartzitos e grés quartzíticos
	Xistos (grafitosos, argilosos e sericíticos)
	Xistos grauvacóides
	Mudança de litologia
	Contacto com falha ou zona de esmagamento
	Fuga de calda para a superfície
	Fracturação hidráulica
	Comunicação entre furos

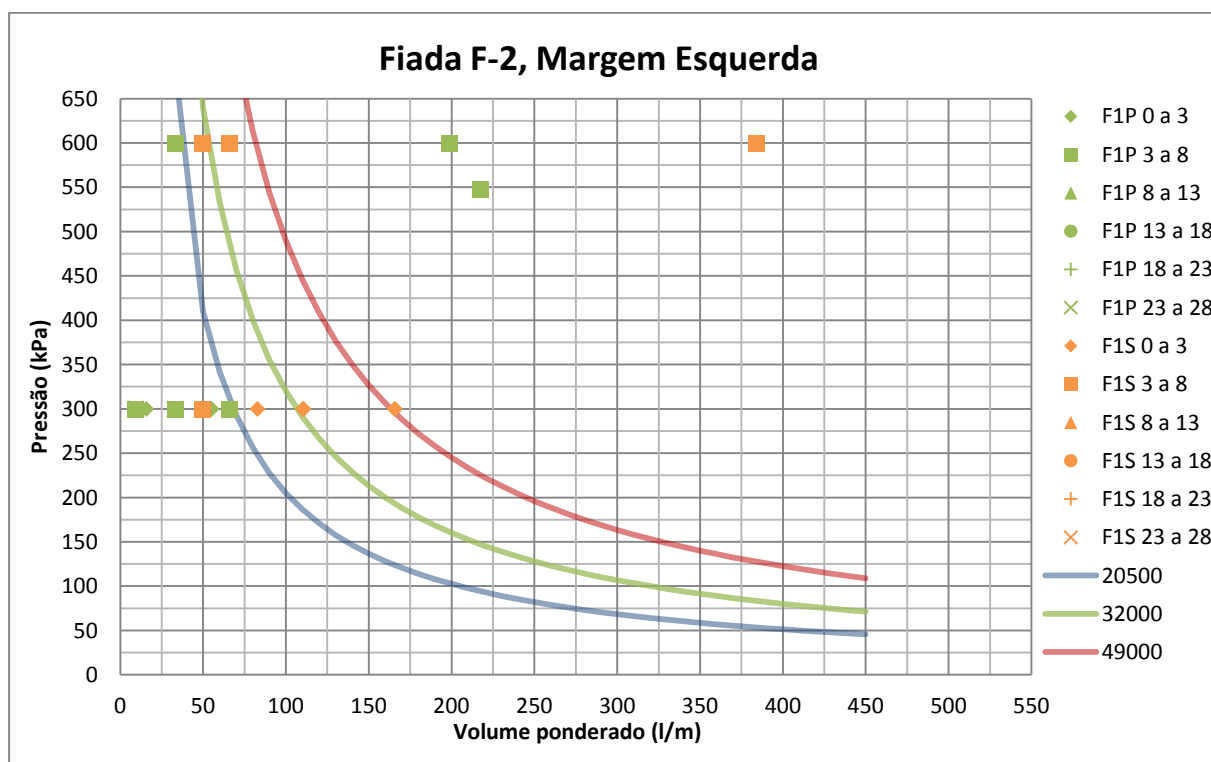
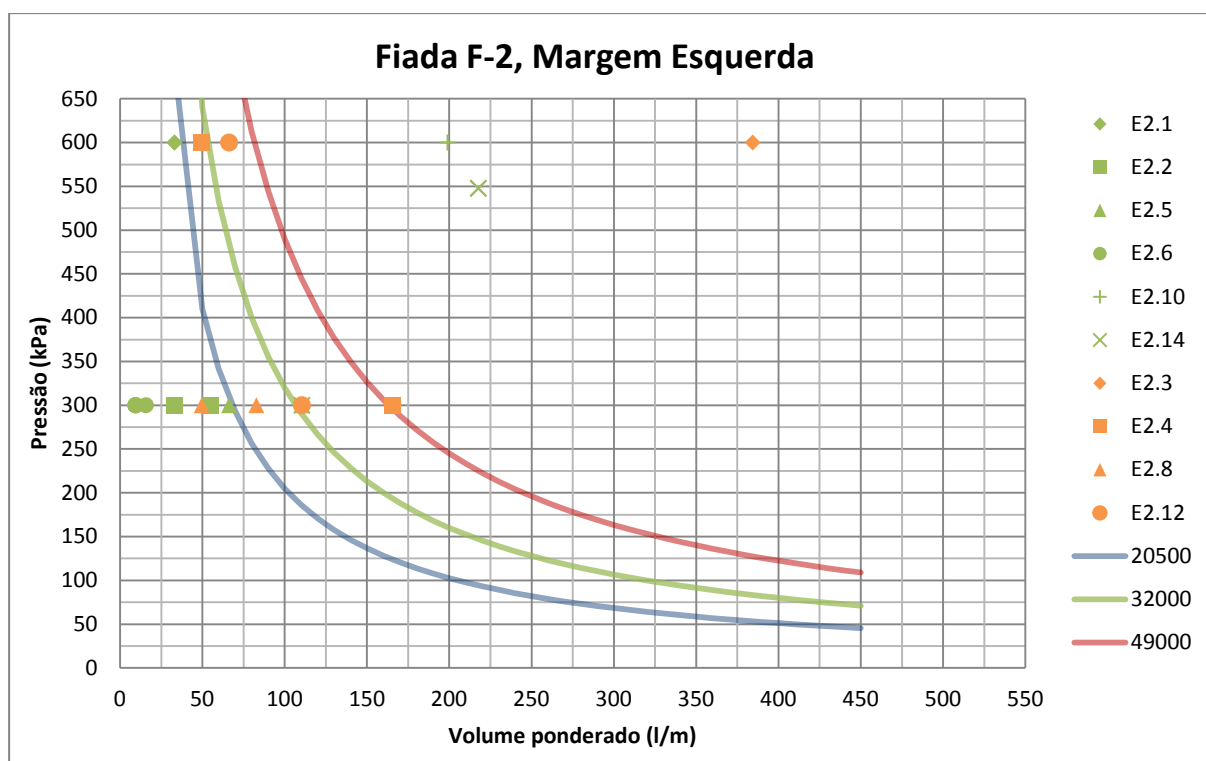
ANEXO 4 - GRÁFICOS P/V COM POTENCIAIS CURVAS GIN

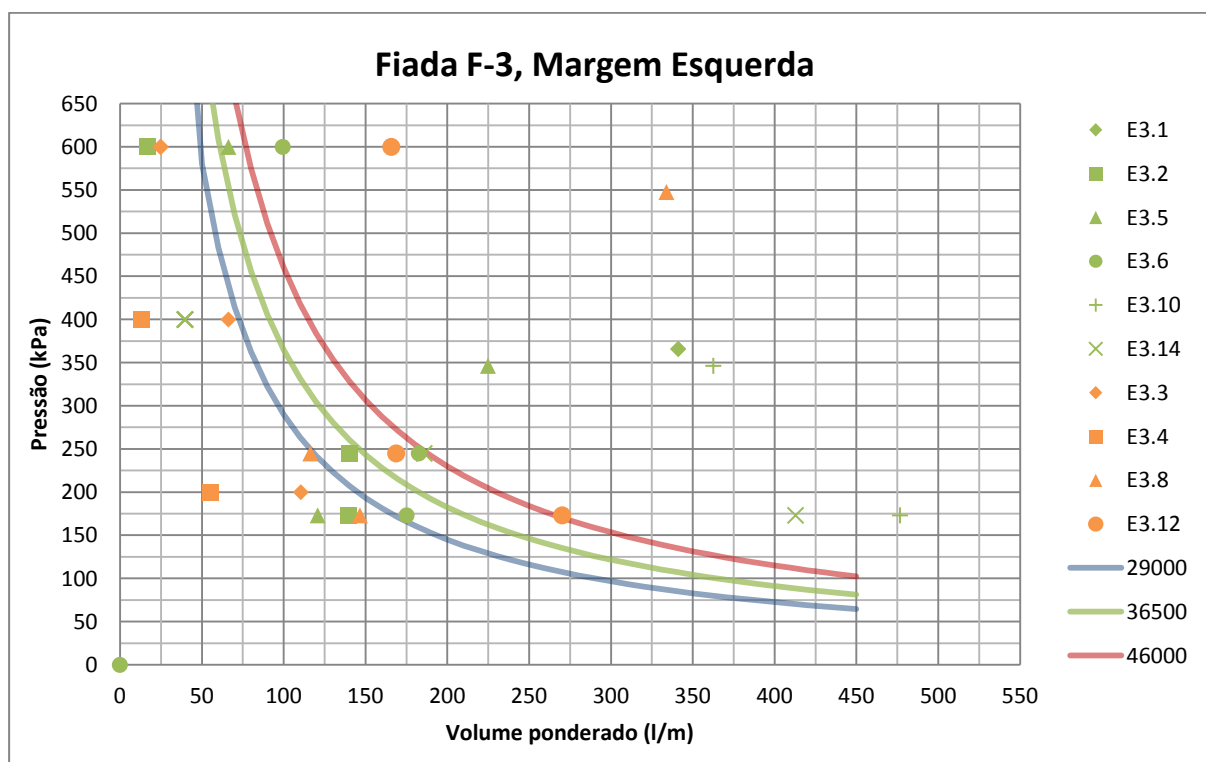
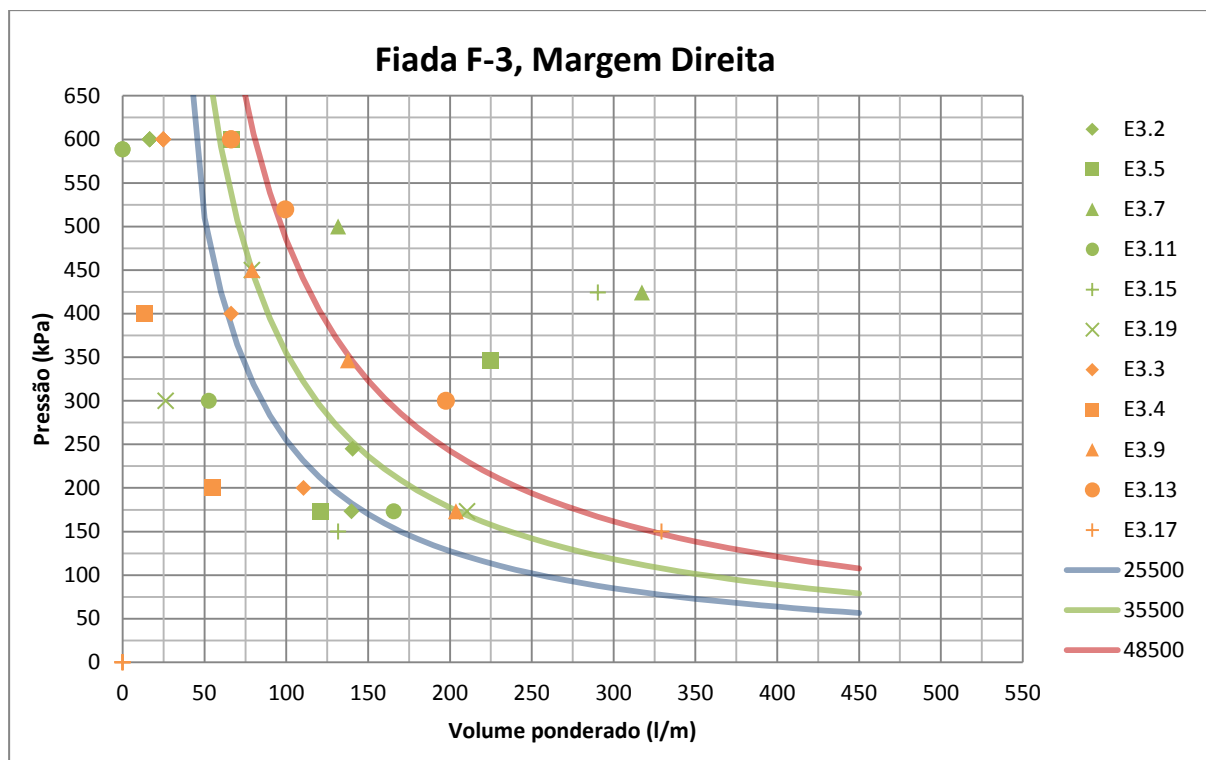


—
— - Potenciais curvas GIN a adotar
—

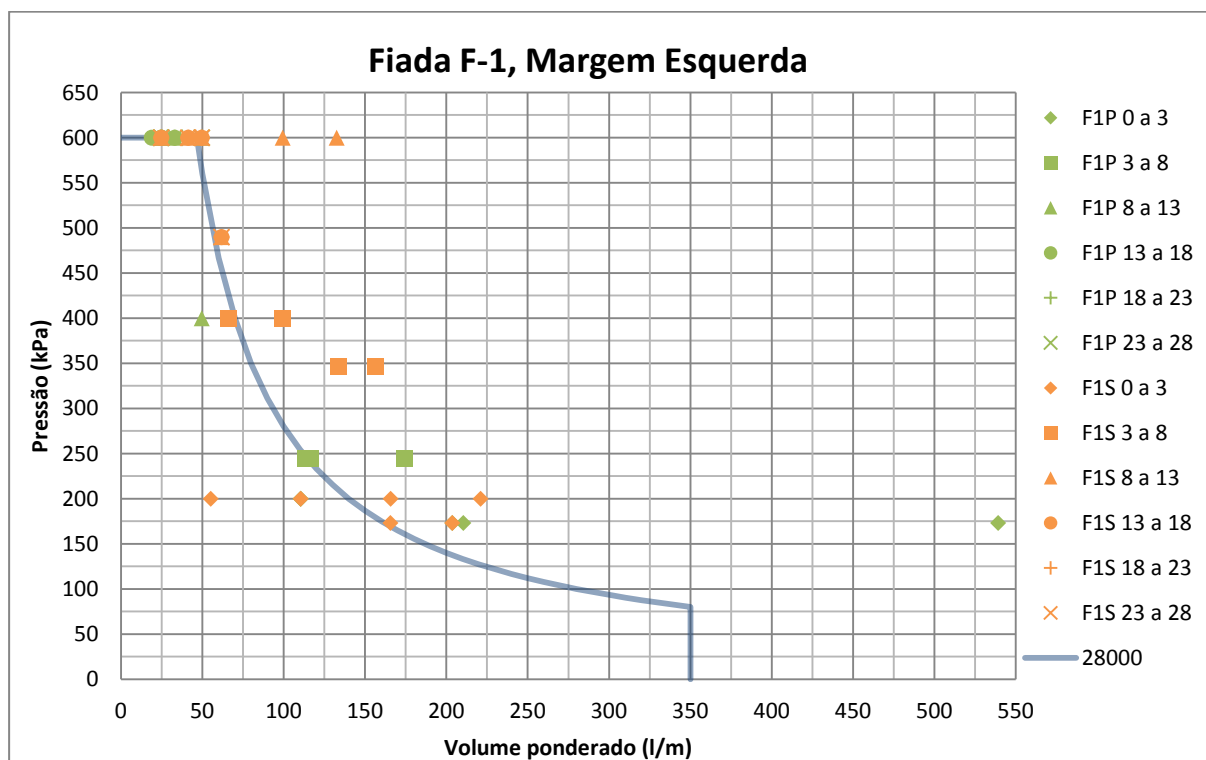
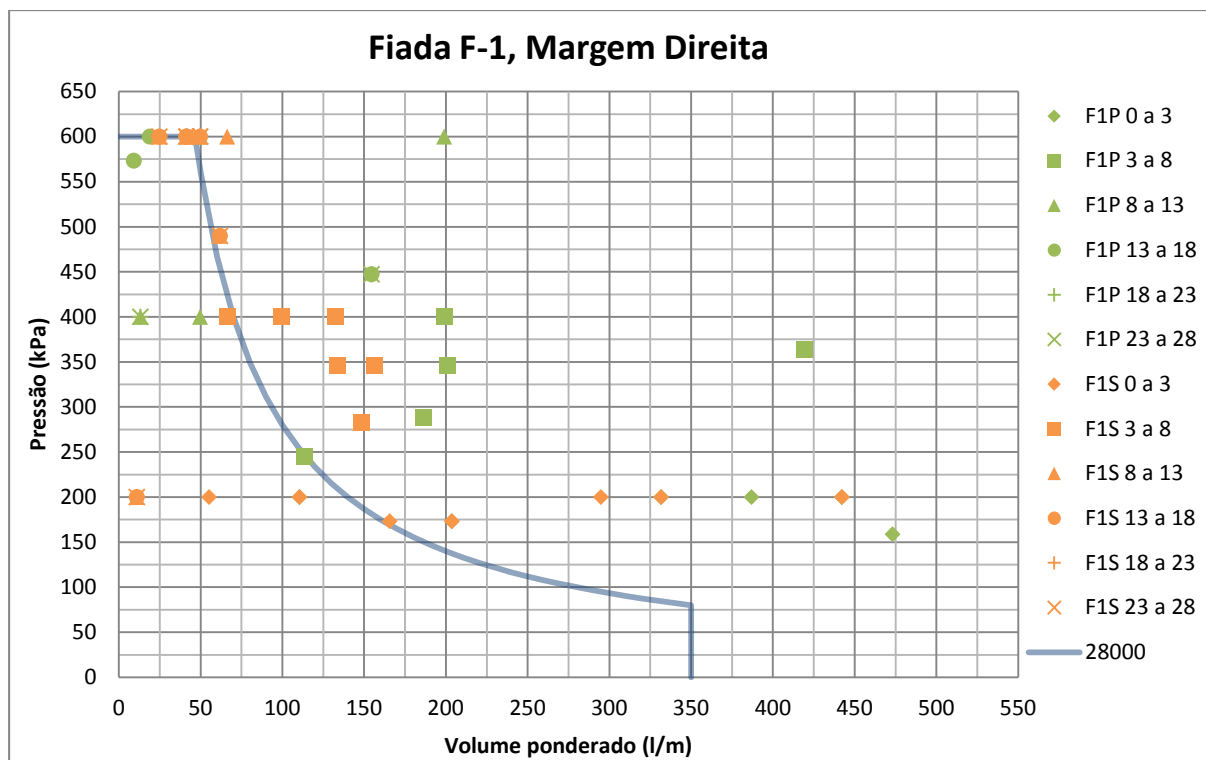








ANEXO 5 - CURVAS GIN ADOTADAS



— - Curva GIN adotada

